



Universidad  
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

INGENIERÍA INDUSTRIAL, ESPECIALIDAD TECNOLOGÍAS  
ENERGÉTICAS

PROYECTO FIN DE CARRERA

# VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS

Autor: Pablo Sánchez Puga

Tutor: Fernando Hernández Jiménez

Leganés, octubre de 2015

## ÍNDICE

## ÍNDICE

ÍNDICE .....	1
RESUMEN .....	3
ABSTRACT .....	3
1. INTRODUCCIÓN .....	5
1.1. CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN .....	5
1.1.1. El fenómeno de fluidización .....	5
1.1.2. Comportamiento fluido de un lecho fluidizado. ....	11
1.1.3. Calidad de fluidización.....	12
1.1.4. Parámetros característicos del lecho de partículas.....	13
1.1.5. Clasificación de las partículas de fluidización.....	15
1.1.6. Formación de burbujas durante la fluidización.....	16
1.1.7. Ventajas e inconvenientes de la aplicación de lechos fluidizados.....	17
1.1.8. Aplicaciones industriales de la fluidización. ....	19
1.2. CONCEPTOS PIV .....	24
1.2.1. Introducción.....	24
1.2.2. Fundamentos .....	26
1.2.3. Métodos de correlación .....	27
1.2.4. Correlación de segundo orden .....	31
1.2.5. La transformada rápida de Fourier o Fast Fourier Transform (FFT).....	31
1.2.6. Algoritmos “multi-grid” .....	33
1.2.7. Interpolación sub-píxel.....	33
1.2.8. Pre-procesado y Post-procesado .....	34
1.2.9. PIV estereoscópico .....	35
1.3. MOTIVACIÓN .....	37
1.4. OBJETIVOS.....	38
2. INSTALACIONES EXPERIMENTALES .....	39
2.2. Instalación 1.....	39
2.3. Instalación 2.....	42
2.4. Instalación 3.....	45
3. CÓDIGOS UTILIZADOS.....	48
3.2. matPIV 1.6.....	49
3.3. matPIV 1.7.....	50
3.4. mPIV .....	50
3.5. openPIV .....	51

## ÍNDICE

3.6.	PIVlab .....	51
3.7.	PIVsuite .....	52
4.	RESULTADOS.....	55
4.2.	CASO 1.....	55
4.2.1.	Primer par de imágenes: .....	56
4.1.2.	Segundo par de imágenes: .....	58
4.1.3.	Tercer par de imágenes: .....	60
4.2.	CASO 2.....	62
4.2.1.	Primer par de imágenes: .....	63
4.2.2.	Segundo par de imágenes: .....	66
4.2.3.	Tercer par de imágenes: .....	68
4.3.	CASO 3.....	70
4.3.1.	Primer par de imágenes: .....	71
4.3.2.	Segundo par de imágenes: .....	74
4.3.3.	Tercer par de imágenes: .....	77
5.	CONCLUSIONES.....	80
	REFERENCIAS .....	82

## RESUMEN

En el presente proyecto se estudia las diferentes alternativas de software libre para el análisis PIV (Velocimetría por Imagen de Partículas) desarrollado para MATLAB [1]. En concreto, se va a adaptar su uso para lechos fluidizados.

Para llevar a cabo esta tarea se ha contado con tres casos que hacen referencia a series de imágenes tomadas de tres instalaciones experimentales que contienen prototipos de lechos fluidizados 2D con diferentes peculiaridades cada una.

Tras una labor de búsqueda se seleccionaron los siguientes códigos para llevar a cabo la comparativa: matPIV 1.6, matPIV 1.7, mPIV, openPIV, PIVlab y PIVsuite.

Para poder realizar un buen análisis se han tenido que llevar a cabo algunas modificaciones en los códigos. Principalmente se han tenido que adaptar para el uso máscaras, cuyo objetivo es evitar el análisis dentro de las zonas donde aparecen burbujas u otros objetos inmersos en el lecho. De este modo, se evita la presencia de resultados en las soluciones que pueden perturbar el análisis, como por ejemplo la “lluvia de partículas” que aparece en el interior de burbujas que se forman. En concreto, de los códigos comparados, un pre-procesado (perteneciente a PIVlab) y un post-procesado (perteneciente a matPIV1.6) se han ido probando en los demás buscando las mejores combinaciones, con la intención de mejorar los resultados y eliminar vectores espurio (*outlier*).

Los códigos seleccionados se han comparado entre sí llevando a cabo el análisis de varias parejas de imágenes pertenecientes a tres instalaciones diferentes tomadas con distintas cámaras digitales. La intención es analizar lechos con distintas peculiaridades seleccionando parejas de fotografías que representen varios estados de crecimiento de las burbujas o situaciones de alta vorticidad.

La comparativa que se ha realizado ha sido principalmente de carácter cualitativo, observando el movimiento real de las parejas y comparándolo con los resultados que los distintos programas han proporcionado. Pero también se han tenido en cuenta algunos valores numéricos como el tiempo de análisis y la velocidad de crecimiento de la cúpula de la burbuja estimada a partir del avance del frente de la burbuja en sucesivos instantes.. Por lo tanto, se ha tenido en cuenta el coste computacional y dichos valores de velocidad que se han podido comparar con los arrojados por los programas.

Todo esto ha servido para el estudio del funcionamiento de dichos códigos PIV en su aplicación para el análisis de lechos fluidizados 2D con distintas configuraciones y ha permitido obtener conclusiones sobre cuál o cuáles de ellos y en función de que situaciones o casos resultan más adecuados para dicho uso.



## ABSTRACT

### ABSTRACT

In the present project different free software alternatives for PIV (Particles Image Velocimetry) calculation developed for MATLAB [1] are studied. Specifically, their use to fluidized beds is going to be adapted.

To accomplish this task it has been taking into account three cases that make reference to image series taken in three experimental facilities that contain 2D fluidized beds prototypes with different peculiarities each one.

After a searching work there were selected the different codes to implement the comparative: matPIV 1.6, matPIV 1.7, mPIV, openPIV, PIVlab y PIVsuite.

To realize a proper analysis it has been necessary to implement some modifications in the codes. Mainly it has been adapted to the use of masks, whose target is to avoid the analysis inside the zones where bubbles or other objects immersed in the bed appear. In this way, it is saved the presence of results that can perturb the analysis, the “particle raining” that appears inside the bubbles formed. Specifically, from the compared codes, a pre-processed (belonging to PIVlab) and a post-processed (belonging to matPIV1.6) has been testing in the rest looking for the best combinations, with the intention of improving the results and to eliminate the outlier vectors.

The selected codes have been compared to each other undertaking the analysis of several pairs of images belonging to three different installations taken with different digital cameras. The aim is to analyse beds with different peculiarities selecting pairs of images that represent several growth stages of the bubbles or high vorticity situations.

The comparative that has been made has mainly a qualitative character, observing the real movement of the image pairs and comparing it with the results that the different programs had given. But also there have been taken into account some numeric values like the analysis time and the growth velocity of the dome of the bubble roughly calculated, knowing the temporal separations between images that has been analysed. Therefore, it has been considered the computational cost and the cited velocity values that has been possible to compare with the ones given by the programs.

All this has served to study the behaviour of the different PIV codes in their use to the analysis of 2D fluidized beds with different configurations and has allowed obtaining conclusions about which of them and in what situations are more suitable to named use.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. CONCEPTOS DE FLUIDIZACIÓN

En este apartado se realizará una introducción al fenómeno de fluidización, definiendo las principales características de su comportamiento, así como los diferentes estados o regímenes en que puede presentarse. Se hablará sobre la influencia de las propiedades de las partículas sometidas a fluidización, llevando a cabo una clasificación de las mismas en función de sus propiedades de fluidización. También se explicará el fenómeno de burbujeo, estudiando el comportamiento global de las burbujas en el interior de un lecho fluidizado. Además se explicarán los aspectos favorables y desfavorables de la fluidización, analizando cómo afectan a la calidad y su buen funcionamiento. Por último, se hablará sobre las aplicaciones industriales de los lechos fluidizados.

#### 1.1.1. El fenómeno de fluidización

La fluidización se refiere al proceso de suspensión o levitación de partículas por la acción del paso de un fluido a través de ellas, de manera que el conjunto de partículas también tiende a comportarse como fluido.

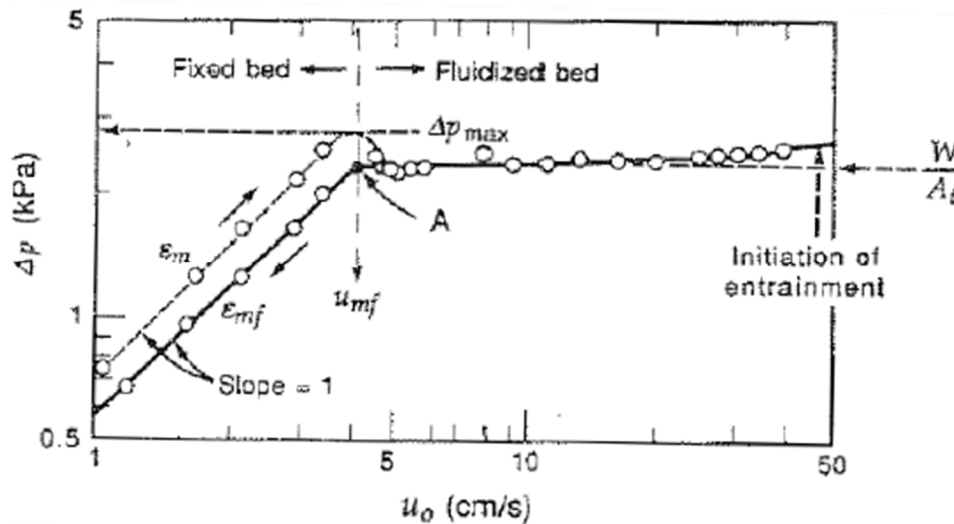
Si se hace circular un fluido a través de un lecho de partículas sólidas con dirección descendente, no tiene lugar ningún movimiento relativo entre las partículas a menos que la orientación inicial de las mismas sea inestable. Si el flujo es laminar, la caída de presión a través del lecho será directamente proporcional a la velocidad de flujo, aumentando más rápidamente a grandes velocidades. Esta relación queda determinada por la ecuación de Ergun (1952) [2].

Si, por el contrario, se hace circular un fluido en con dirección ascendente a baja velocidad sobre un lecho de partículas, el fluido se filtra por los espacios entre partículas, que permanecen estáticas. Este estado se denomina lecho fijo. Con un incremento de la velocidad del fluido, estas partículas se empiezan a mover de manera independiente, mediante pequeñas vibraciones.

Al ir aumentando la velocidad, llega un punto en el que las partículas se quedan suspendidas en la corriente del fluido en el cual, la fuerza debida al rozamiento se iguala al peso de las partículas. Por lo tanto, desaparece la componente vertical de la fuerza de compresión entre las partículas adyacentes. De este modo, la pérdida de carga a través de un volumen determinado de lecho es igual al peso de las partículas adyacentes por unidad de área.

En este punto surge el comienzo de la fluidización y marca la transición entre el lecho fijo y el lecho completamente fluidizado. Al valor de la velocidad necesaria para que se inicie la fluidización se le denomina **velocidad mínima de fluidización**,  $u_{mf}$ . Para obtener  $u_{mf}$ , en ausencia de datos experimentales, existen correlaciones obtenidas por resultados experimentales. La ecuación más aceptada es la de Wen y Yu (1966) [3].

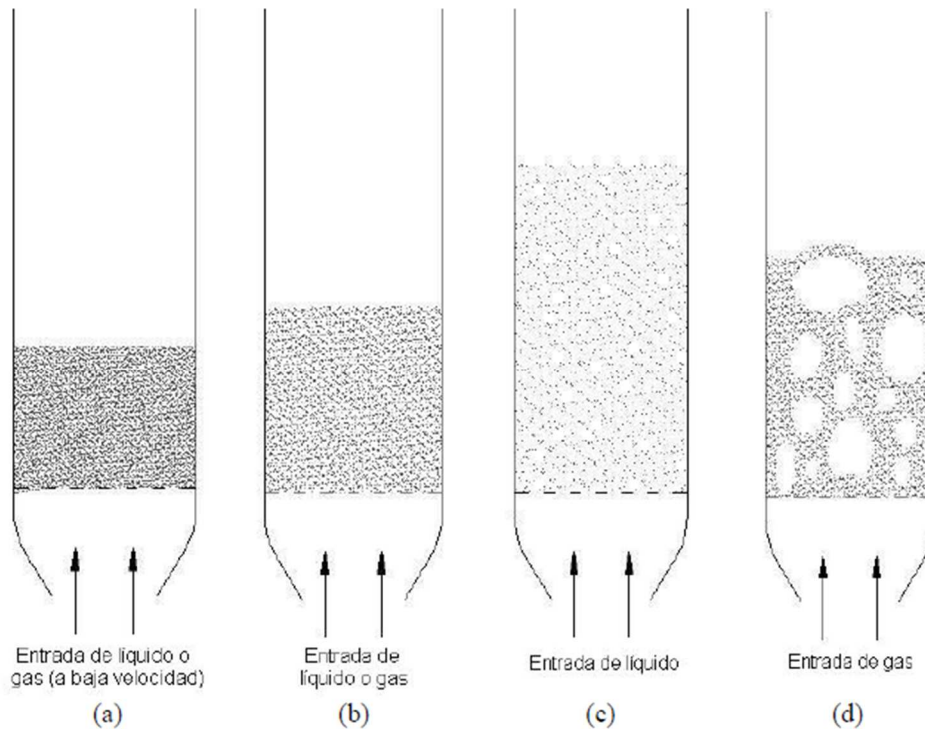
En la siguiente gráfica se puede observar el proceso descrito por el cual tiene comienzo la fluidificación.



**Figura 1.** Presión frente a velocidad para un lecho fluidizado con arena fina de tamaño uniforme [4].

En los sistemas fluidizados por líquido, un aumento de la velocidad por encima de la mínima de fluidización, normalmente da lugar a una suave y progresiva expansión del lecho. Esto favorece que se amortigüen las posibles inestabilidades provocadas por un flujo irregular y que no se observen heterogeneidades ni formación de burbujas en el lecho. Un lecho con estas características se denomina de **fluidización particulada, no burbujeante u homogénea**. Cabe mencionar que en sistemas fluidizados por gas resulta poco frecuente la aparición de este comportamiento de fluidización, salvo en ciertos casos con partículas muy ligeras con gas denso a alta presión.

El comportamiento en sistemas fluidizados por gas es distinto. La fluidización uniforme se obtiene únicamente a velocidades relativamente bajas. Al aumentar la velocidad por encima de la mínima de fluidización se observan grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales. A mayores velocidades, la agitación pasa a ser más violenta y el movimiento de las partículas más intenso, aunque el lecho no se expande mucho más de su volumen de mínima fluidización. El lecho toma el aspecto de un líquido en ebullición, moviéndose los sólidos vigorosamente y ascendiendo rápidamente grandes burbujas a través del lecho. Un lecho con este comportamiento se denomina de **fluidización agregativa, burbujeante o heterogénea**. Cabe mencionar que, en ocasiones concretas, los sistemas fluidizados por líquido también se comportan como lechos burbujeantes, tal es el caso de sólidos muy densos fluidizados por líquidos de baja densidad.



**Figura 2.** Distintos modos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido: (a) Lecho fijo; (b) Lecho en comienzo de fluidización; (c) Lecho con fluidización no burbujeante [4].

Los lechos fluidizados tanto por líquido como por gas se consideran lechos fluidizados de fase densa cuando existe un límite superior que define con claridad la superficie del lecho de partículas.

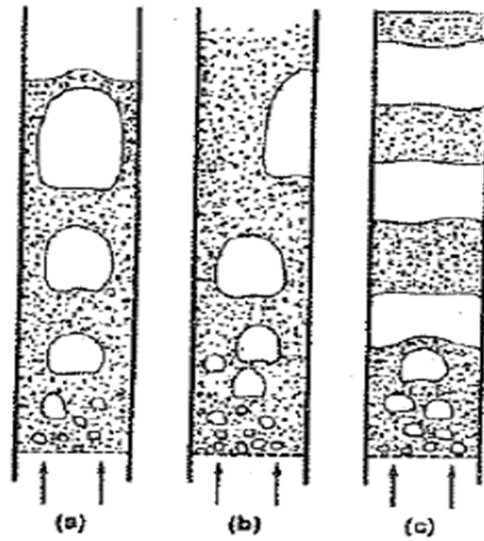
Como ya se ha comentado, cuando se incrementa la velocidad por encima de la mínima de fluidización, sobre todo en los lechos fluidizados por gas, se entra en régimen de fluidización agregativa. En los casos en que los lechos de elevada longitud y pequeño diámetro, las burbujas pueden llegar a ser lo suficientemente grandes como para ocupar el lecho de manera transversal. Este fenómeno recibe el nombre de **slugging**, caracterizado por partículas de tamaño próximo al ancho del depósito, denominadas slugs. Pueden aparecer tres tipos de slugging, dependiendo del tamaño de las partículas del lecho.

En el caso de las partículas más finas y lisas, estas caen suavemente hacia abajo por las cercanías de la pared, alrededor de las burbujas de elevado tamaño que ascienden sin entrar en contacto con la pared del depósito. El fenómeno se conoce como slugging con **slugs axiales**.

Para partículas ásperas de pequeño tamaño, con paredes ásperas y velocidades altas, la burbuja asciende como en el caso de slugs axiales pero en los tramos superiores del lecho la burbuja se adhiere a la pared del depósito, perdiendo la simetría. Este fenómeno se conoce como **slugs de pared**.

Para partículas de mayor diámetro, la fracción de lecho por encima de la burbuja es empujada hacia arriba como un pistón, sin que se caiga por los lados de ésta. Las partículas “llueven” a

través del slug, que finalmente se desintegra. A partir de dicho instante se forma un nuevo slug, y así en lo sucesivo. Este fenómeno se denomina **slug plano**.

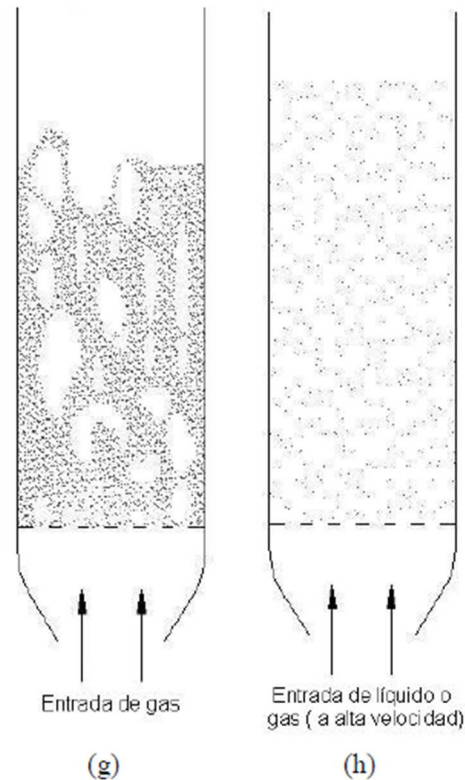


**Figura 3.** Tipos de slugs en lechos fluidizados. (a) Slugs axiales; (b) Slugs de pared; (c) Slugs planos [4].

El fenómeno del slugging se tiene que tener muy en cuenta en el diseño de lechos con depósitos estrechos y largos.

En la fluidización de partículas finas a una velocidad del gas lo suficientemente alta, se supera el valor de la velocidad terminal de los sólidos, a partir de la cual, el arrastre aerodinámico de las partículas puede ser lo suficientemente grande para transportarlas fuera del sistema (elutriación). En este momento, el arrastre de partículas llega a ser apreciable, con lo que desaparece la superficie superior del lecho. En lugar de burbujas se observa un movimiento turbulento de paquetes de sólidos y espacios llenos de gas de varias formas y tamaños. Este estado se denomina de **lecho fluidizado turbulento**.

Con un aumento de la velocidad del gas aun mayor, las partículas abandonan el lecho con el gas. Este régimen de funcionamiento se denomina **lecho fluidizado de fase dispersa** con transporte neumático de partículas.

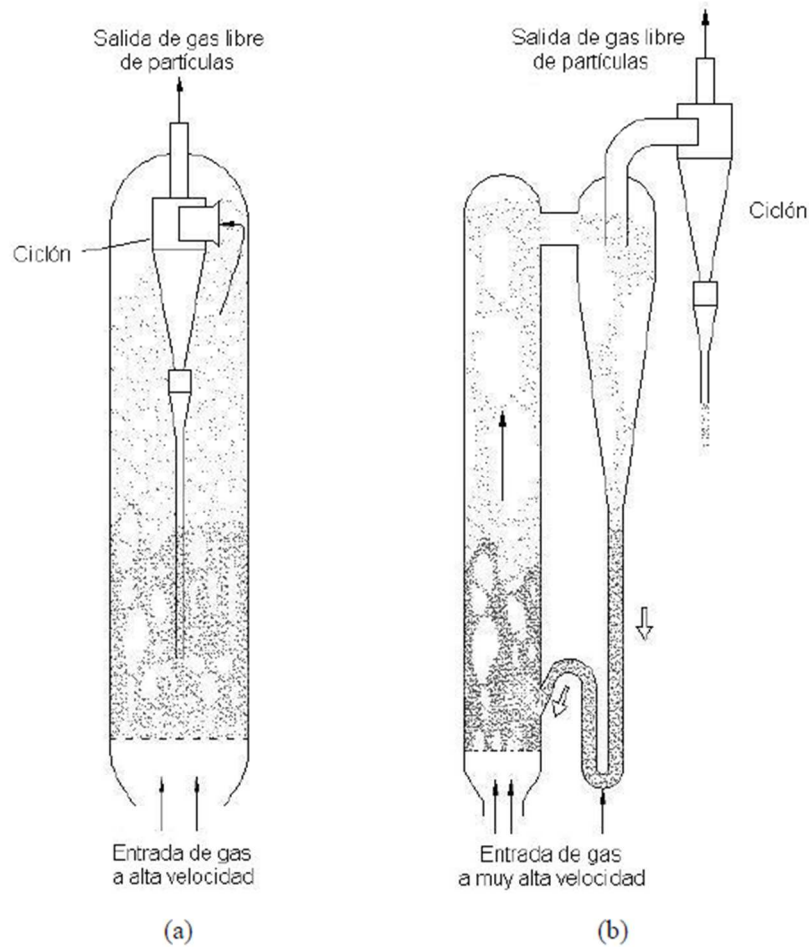


**Figura 4.** Distintos modos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido. (g) Fluidización turbulenta; (h) Fluidización en fase dispersa con transporte neumático de partículas [4].

Tanto en la fluidización turbulenta como en la de fase dispersa con arrastre neumático de partículas, se arrastran grandes cantidades de partículas que es necesario recuperar y devolver al lecho. Esta función la desempeñan los ciclones, que son unos elementos de sedimentación que actúan gracias a la fuerza centrífuga. Los sistemas que emplean ciclones para la recuperación de partículas son conocidos como lechos fluidizados circulantes. En los lechos fluidizados turbulentos con arrastre moderado de partículas se utilizan ciclones internos. En los lechos fluidizados de fase dispersa, donde el arrastre de partículas es mayor, normalmente se emplean grandes ciclones fuera del lecho. En general, en los lechos fluidizados circundantes es crucial, para que tenga un funcionamiento adecuado, que la recirculación de partículas a través de los elementos de retención se suave y uniforme.

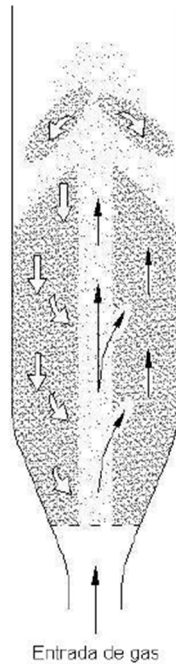
## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS

### INTRODUCCIÓN



**Figura 5.** Ejemplos de lecho fluidizado circulante: (a) Lecho fluidizado turbulento (con ciclón interno); (b) Lecho fluidizado de fase dispersa (con ciclón externo) [4].

Cuando se utiliza gas para fluidizar, con altas velocidades y las partículas son relativamente grandes, el gas sale como un chorro que arrastra partículas hacia la superficie del lecho. Los sólidos se mueven hacia abajo alrededor del chorro y también dentro del chorro. Se puede observar un comportamiento mixto, entre burbujeante y de chorro, así este sistema es denominado **lecho fluidizado de chorro** (spouted bed).



**Figura 6.** Lecho de chorro [4].

En comparación con otros modos de contacto sólido-gas, el lecho fluidizado tiene algunas propiedades de gran utilidad. En el caso de lechos fluidizados de contacto sólido-líquido, la utilidad es menor debido fundamentalmente a su comportamiento. Por lo que, hasta el momento, las aplicaciones industriales de fluidización más importantes son de contacto sólido-gas.

#### **1.1.2. Comportamiento fluido de un lecho fluidizado.**

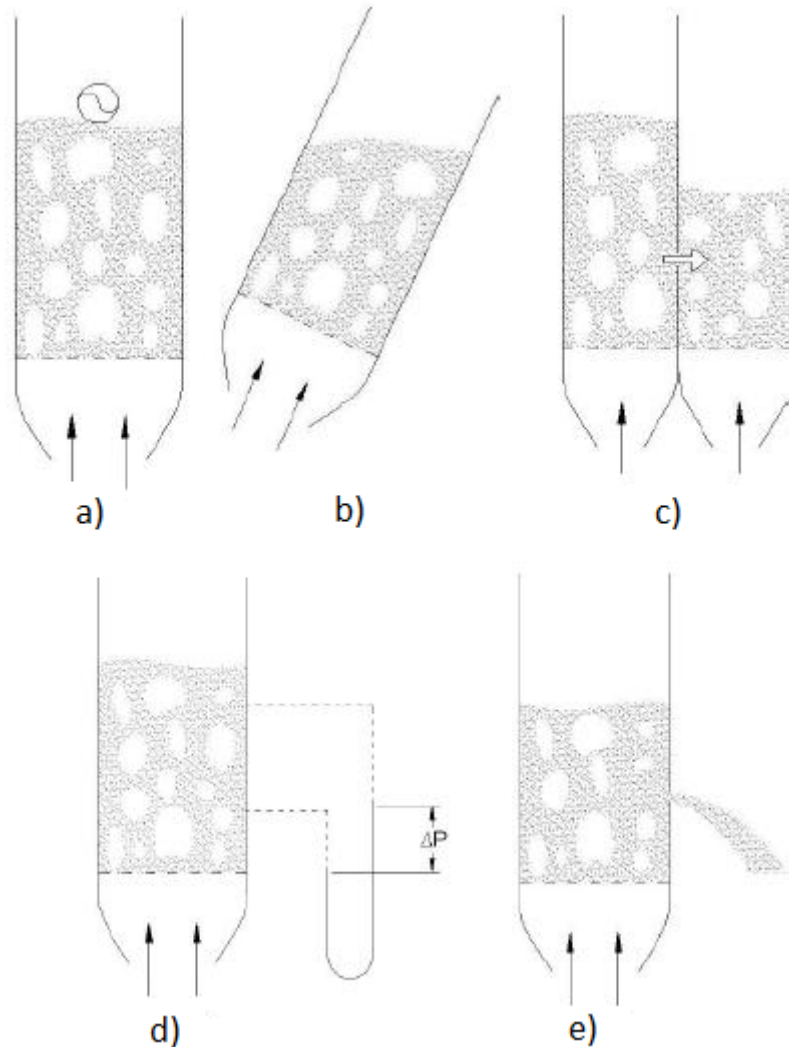
Como se ha comentado, si un lecho de partículas de fase densa es fluidizado con gas, su comportamiento se asemeja, desde un punto de vista macroscópico, al de un fluido. Por lo tanto, si un objeto de tamaño grande, en relación a las partículas, y de menor densidad, es sumergido en el interior del lecho y se deja libre, este sale a la superficie y flota, al igual que ocurriría con cualquier fluido de mayor densidad.

Además, si se inclina el depósito que aloja en su interior el lecho, la superficie de este último se mantiene horizontal, al igual que en un depósito que albergara en su interior cualquier fluido, debido al potencial gravitatorio.

También, si se conectan dos lechos independientes, se igualan sus niveles en el caso de ser estos diferentes, a través del conducto conector. Las partículas del lecho fluyen de uno a otro para igualar sus potenciales. Cabe señalar que la diferencia de presión en dos puntos del lecho es directamente proporcional a la diferencia de alturas.

Y, del mismo modo, si se practica un orificio en la pared del depósito, las partículas se desplazan formando un chorro.





**Figura 7.** Comportamiento fluido de un lecho de partículas fluidizado: (a) Los objetos ligeros flotan sobre la superficie del lecho; (b) La superficie se mantiene horizontal al inclinar el lecho; (c) Al poner en contacto dos lechos sus niveles se igualan; (d) La diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia entre sus alturas.; (e) Las partículas abandonan el lecho describiendo un chorro a través de un agujero practicado en la pared [4].

El comportamiento fluido que presentan los lechos fluidizados permite idear diferentes diseños de contacto entre las partículas del lecho y el gas o el líquido, para su aplicación en diversos procesos industriales.

### 1.1.3. Calidad de fluidización.

La capacidad para fluidizar de las partículas y las condiciones de operación que lo permiten varían mucho de unos sistemas a otros y están influidas por múltiples factores. El primero de estos factores fundamentales es el tamaño de los sólidos y qué distribución guardan estos.

Las partículas finas con una amplia distribución de tamaños son capaces de fluidizar en un amplio rango de velocidades del gas, permitiendo operaciones con lechos profundos y grandes, ofreciendo cierto grado de flexibilidad. Pero hay que tener en cuenta que las partículas

## INTRODUCCIÓN

pequeñas tienden a aglomerarse si están húmedas, debido a ello se debe agitar el lecho para obtener unas buenas condiciones de fluidización. Esta tarea se puede llevar a cabo con agitadores mecánicos u operando a velocidades del gas relativamente altas, utilizando la energía cinética del gas entrante para agitar los sólidos.

Por el contrario, los lechos constituidos por partículas grandes con distribución de tamaños uniforme suelen fluidizar peor ya que suelen aparecer sacudidas, chorros y slugging, lo que puede ser perjudicial y dañino para la instalación y causar daños estructurales, especialmente en lechos de gran tamaño. Este problema se puede solucionar añadiendo pequeñas cantidades de partículas más finas, que actúan como lubricante de las partículas grandes. El rango de velocidades para lechos constituidos por partículas más gruesas es mucho menor. Debido a esto, se deben utilizar lechos poco profundos para fluidizar partículas de tamaños grandes.

El segundo de los factores fundamentales que condicionan la calidad de la fluidización es la relación de densidades entre el fluido y las partículas. Normalmente, los lechos por contacto sólido-líquido fluidizan de manera homogénea, mientras que los lechos por contacto sólido-gas suelen presentar heterogeneidades. A pesar de ello, es posible observar comportamientos atípicos con partículas de baja densidad en gases de densidad elevada o con partículas de alta densidad con líquidos poco densos.

Existen otros factores que pueden afectar a la calidad de fluidización, como son la geometría del lecho, los dispositivos de alimentación de gas o el tipo de partícula utilizada. Por último, cabe mencionar que la geometría y tamaño de las burbujas dependen de los dispositivos de alimentación de gas ubicados en la parte inferior del depósito.

### 1.1.4. Parámetros característicos del lecho de partículas.

Para determinar la masa de las partículas que componen el lecho se utiliza la **densidad de partícula** ( $\rho_p$ ), que se define como el cociente entre la masa de una partícula ( $m_p$ ) y su volumen hidrodinámico ( $V_h$ ). Entendiéndose volumen hidrodinámico como el volumen visto por el fluido en su interacción con la partícula, incluyendo el de todos los poros que ésta pueda tener.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_h}$$

Si se trata de partículas no porosas, este parámetro se puede medir fácilmente con la ayuda de aparatos como el picnómetro. Pero, en el caso de partículas porosas, carece de utilidad ya que da el valor de la densidad absoluta (masa de partícula entre el volumen de material sólido que compone la partícula), que no es apropiado para el estudio de la interacción con un fluido. Por lo tanto, si se trata de partículas porosas, la densidad de partícula no es fácil de medir directamente aunque se han propuesto diversos métodos para hacerlo.

Otro parámetro que permite caracterizar el lecho de partículas es la **densidad aparente del lecho** ( $\rho_b$ ), que se define como el cociente entre la masa de todas las partículas del lecho ( $m_b$ )

## INTRODUCCIÓN

y el volumen aparente ( $V_{ap}$ ). Entendiendo volumen aparente como el volumen que ocupan todas las partículas, incluyendo los espacios vacíos entre ellas.

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}}$$

La **porosidad del lecho** hace referencia a los espacios vacíos existentes dentro del lecho y está afectada por ciertos factores. Aquellos aspectos que tienen mayor influencia sobre la porosidad del lecho son: el tamaño, la forma y la rugosidad de las partículas, la relación existente entre el diámetro de la partícula y el diámetro del lecho, y la rugosidad de las paredes de la columna. La porosidad existente en los lechos uniformes es mayor que aquella de los lechos no uniformes. Se define como la relación el volumen de los espacios entre partículas y el volumen aparente del lecho.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum V_h}{V_{ap}} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p}$$

Utilizando este parámetro, se puede establecer la dependencia entre las densidades de lecho y partícula.

$$\rho_b = (1 - \varepsilon)\rho_p$$

La porosidad del lecho cuando comienza la fluidización, recibe el nombre de porosidad mínima de fluidización ( $\varepsilon_{mf}$ ).

El tamaño de las partículas esféricas puede ser cuantificado sin ambigüedad. Las dificultades se presentan con las partículas no esféricas. El tamaño de las partículas más grandes ( $> 1$  mm) puede ser medido con calibradores o micrómetros si las partículas son regulares en la forma, ser pesadas cierto número de partículas si su densidad es conocida, o mediante desplazamiento de líquido si estas no son porosas. Para estas medidas, lo primero que se calcula es el **diámetro promedio de las partículas**, que representa el diámetro de una esfera con la misma relación superficie a volumen que la partícula no esférica en cuestión.

$$\overline{d_p} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}}$$

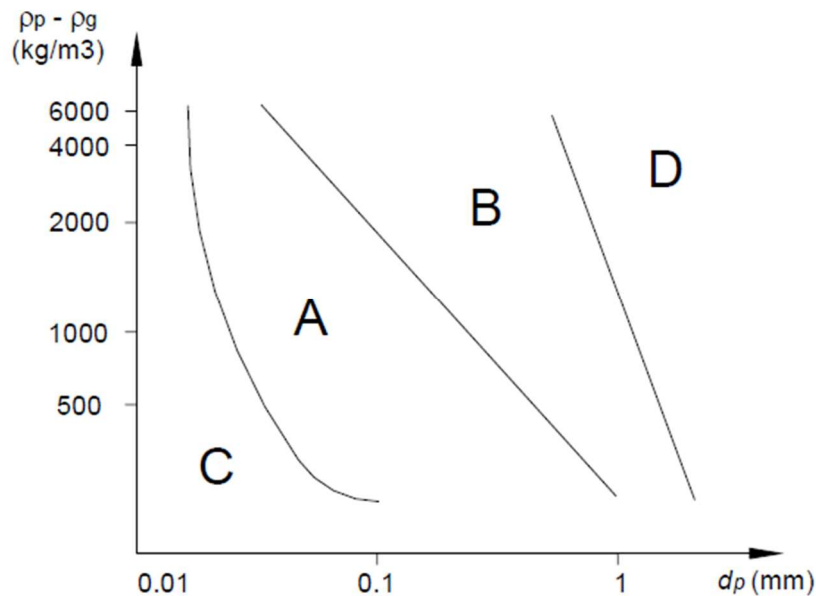
Donde  $x_i$  es la frecuencia relativa del tipo de partícula  $i$  y  $d_{pi}$  el tamaño de dicho tipo de partícula.

Debido a que en la mayoría de las aplicaciones reales de los lechos fluidizados las partículas del sólido no son esféricas, se les asocia un factor de esfericidad. La **esfericidad** es la relación que existe entre el área de una esfera y el área real de la partícula, ambas del mismo volumen.

$$\varphi = \left( \frac{\text{Área de una esfera}}{\text{Área de la partícula}} \right)_{\text{para un mismo volumen}}$$

### 1.1.5. Clasificación de las partículas de fluidización.

Existen varias formas de clasificar a las partículas en un lecho fluidizado, la más común es la clasificación realizada por Geldart [5] en donde estas pueden clasificarse en cuatro tipos atendiendo a sus propiedades de fluidización por aire, en condiciones ambiente.



**Figura 8.** Clasificación de las partículas según Geldart por peso y tamaño [5].

**Grupo A:** A este grupo pertenecen los materiales granulares poco densos y cuyo tamaño de partícula es pequeño. Fluidizan una vez que la velocidad supera el valor de velocidad mínima de fluidización ( $u_{mf}$ ), en un estado de no burbujeante. A partir de cierto valor de velocidad, llamado velocidad mínima de burbujeo ( $u_{mb} > u_{mf}$ ), comienza el estado burbujeante.

**Grupo B:** Estos materiales tienen tamaños de partícula y/o densidades intermedias. Cuando se fluidizan este tipo de partículas, aparecen burbujas visibles tan pronto como la velocidad supera la velocidad mínima de fluidización. Por tanto, en estos materiales  $u_{mb} = u_{mf}$ .

**Grupo C:** Estos materiales tienen tamaños de partícula muy pequeños, lo que hace que las fuerzas atractivas entre partículas sean mayores que las fuerzas que el fluido puede ejercer sobre cada partícula individual. La fluidización como tal no se produce, debido a que tienden a aglomerarse sin mezclarse uniformemente con el fluido, que se filtra a través de canales en los que no hay partículas. Sin embargo, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o mediante vibración.

**Grupo D:** Los materiales de este tipo están formados por partículas muy grandes o muy densas, por lo que es muy difícil fluidizarlos. En este grupo  $u_{mb} > u_{mf}$ , por lo que las burbujas crecen de manera continua sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado. Se caracterizan por formar lechos de chorro.

## INTRODUCCIÓN

Las propiedades que presentará una partícula fluidizada con aire se pueden predecir si esta se encuentra dentro de uno de estos 4 grupos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que si la fluidización se realiza a temperaturas o presiones distintas de la atmosférica puede suponer que una partícula muestre un comportamiento propio de un grupo diferente al que pertenecería operando bajo condiciones estándar.

El estado de fluidización burbujeante es el más común en los sistemas de uso comercial, puesto que el rango de velocidades del gas en que tiene lugar el estado no burbujeante con partículas del Grupo A es muy reducido. En este grupo, donde  $u_{mb} > u_{mf}$ , las burbujas se dividen y coalescen continuamente existiendo un máximo tamaño de burbuja alcanzado. De ahí que la fluidización sea suave y de buena calidad.

A continuación, se muestra una tabla resumen de esta clasificación con las características de los cuatro grupos definidos por Geldart:

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización Muestran un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo a $U_{mf}$	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Tamaño elevado
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina Cemento	Grava Granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de desaireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	No hay burbujas, sólo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Sólo en lechos poco profundos	No	Sí, incluso en lechos profundos

**Tabla 1.** Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas [5].

### 1.1.6. Formación de burbujas durante la fluidización.

En el estudio de un lecho con fluidización burbujeante se pueden distinguir, por un lado, las **burbujas**, que son los vacíos que se crean en el momento que la expansión deja de ser homogénea y, por otro lado, la **fase de partículas** (emulsión), fluidizadas generalmente por un gas intersticial. Experimentalmente se ha demostrado la existencia de una tercera fase, con características distintas a las existentes dentro de la emulsión o dentro de las burbujas. Esta fase se encuentra alrededor de las burbujas y se denomina nube. De este modo existen modelos de

## INTRODUCCIÓN

dos fases (fase burbuja y fase emulsión) y modelos de tres fases (fase nube, fase burbuja y fase emulsión). Por lo general, en los modelos de dos fases se considera que la nube forma parte de la emulsión y en los de tres fases se considera la nube como una fase independiente, de modo que intercambian calor y masa a través de las dos interfaces que separan las tres fases.

La formación de burbujas es causante del movimiento de la fase de partículas (emulsión), el cual es el principal factor de mezclado en lechos burbujeantes. El movimiento de partículas es causante de la uniformidad térmica y altos niveles de transferencia de calor.

Se ha comprobado experimentalmente que el comportamiento de un lecho fluidizado en estas condiciones se comporta de manera similar que un líquido burbujeante de baja viscosidad. Podemos decir que la forma de las burbujas es parecida, en ambos casos: casi esféricas las de pequeño tamaño, alargadas y deformadas cuando crecen y esféricas con forma de tapón las de mayor tamaño. También, en ambos casos, se observa el ascenso lento de las burbujas más pequeñas, que va siendo más rápido a medida que el tamaño de estas va aumentando, pudiendo una serie de burbujas pequeñas coalescer en una más grande.

Además, se ha comprobado de forma experimental que la **velocidad de ascenso de las burbujas** depende de los mismos factores en los dos casos, pudiendo determinarse con expresiones muy similares. Existe una correlación experimental por la cual la velocidad de ascenso de una burbuja de tamaño grande y de forma esférica en un líquido, es aplicable a una burbuja que se forma dentro de un lecho fluidizado. Esta expresión ha sido desarrollada por Davies y Taylor [6], y se enuncia del mediante la siguiente expresión:

$$U_{br} = 0.711 \cdot (g \cdot D_b)^{1/2}$$

donde  $D_b$  es el diámetro de la esfera cuyo volumen es igual al de la burbuja y  $g$  la aceleración de la gravedad.

El caudal de aire, al ser introducido en el lecho para que la fluidización se lleve a cabo, se divide en dos partes, una que atraviesa el lecho en forma de burbujas y otra que lo hace mediante emulsión gas-sólido. Si el caudal de gas es superior al que se necesitaría para fluidizar el lecho completo (a una velocidad igual a la de mínima fluidización), pasaría una mayor cantidad de aire a través del lecho en forma de burbujas, manteniéndose la fase de emulsión en estado de mínima fluidización.

### 1.1.7. Ventajas e inconvenientes de la aplicación de lechos fluidizados.

Los lechos fluidizados muestran ciertas características, algunas deseables y otras que se presentan como desventajas a la hora de operar como lecho fluidizado. Entre los **aspectos ventajosos** de estos sistemas encontramos:

- El comportamiento fluido que presentan las partículas en estado de fluidización permite desarrollar las operaciones con facilidad.

## INTRODUCCIÓN

- La rapidez con la que las partículas se mezclan facilita la consecución de valores de temperatura constantes en todo el lecho, lo que confiere sencillez y seguridad al control de la operación.
- Un lecho con partículas bien mezcladas resiste con eficacia las rápidas variaciones de temperatura, responde lentamente a los cambios bruscos en las condiciones de operación y ofrece un gran margen de seguridad, evitando pérdidas de temperatura en reacciones altamente exotérmicas.
- La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible conservar (o suministrar) grandes cantidades de calor que se puedan producir (o necesitar) en reactores de gran tamaño.
- Las velocidades de transferencia de calor y masa entre gas y partículas son superiores que en otros sistemas de mezclado.
- La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en él es sublime, por lo que los intercambiadores de calor sumergidos en lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente pequeña.

Por las razones anteriormente expuestas, los lechos fluidizados se presentan como un recurso ideal a la hora de llevar a cabo ciertas operaciones industriales. No obstante, presentan una serie de **desventajas** que impiden su desarrollo en ciertas aplicaciones. Las principales desventajas que presentan los lechos fluidizados son:

- En lechos con fluidización burbujeante de partículas finas, la dificultad para definir el flujo de gas supone un mezclado ineficiente. Esto supone un factor de vital importancia cuando es requerida una conversión elevada de reactantes gaseosos o una alta selectividad para una reacción intermedia.
- La rápida mezcla de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variables. En el tratamiento continuo de sólidos, se tiene un producto no uniforme y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión. Para reacciones catalíticas el movimiento de partículas catalizadoras porosas, que continuamente capturan y liberan moléculas de gas reactante, contribuye al mezclado posterior de reactantes gaseosos disminuyéndose así el rendimiento del sistema.
- La erosión en depósitos y tuberías debido a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. A su vez las partículas muy finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser remplazadas o reintroducidas, mediante circuitos diseñados para ello.
- En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de las partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de manera considerable.

## INTRODUCCIÓN

La gran ventaja que presentan los lechos en relación a la economía es la que ha permitido su desarrollo exitoso en operaciones industriales. A pesar de todo, ese éxito y aceptación en la industria pasa por entender e intentar superar del mejor modo sus desventajas.

### 1.1.8. Aplicaciones industriales de la fluidización.

A continuación se presentan las principales aplicaciones, de carácter industrial, en las que se emplean lechos fluidizados. Una de las principales aplicaciones es en **operaciones físicas**: intercambiadores de calor, recubrimientos de objetos metálicos, adsorción de componentes u operaciones de secado. Además, se usan en procesos químicos de distinta naturaleza, como pueden ser las **reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos, combustión e incineración, gasificación, activación de carbón, calcinación y tratamiento de minerales**. Particularmente, en el campo de la biología, una aplicación de los lechos fluidizados, es el **cultivo de microorganismos**.

A continuación, se realizará una breve descripción de cada una de ellas:

#### 1.1.8.1. Operaciones físicas

- Intercambio de calor.

Los lechos fluidizados llevan tiempo utilizándose como intercambiadores de calor, debido a su gran capacidad para transferir calor y mantener la temperatura de operación uniforme. Su uso es adecuado cuando es necesario enfriar metales o aleaciones de manera rápida, de cara a obtener ciertas propiedades requeridas. En algunas aplicaciones el intercambio de calor se produce sin contacto entre las partículas y el gas de refrigeración, que circula a través de tubos que se encuentran en el interior del lecho fluidizado.

- Recubrimiento de objetos metálicos

Se pueden realizar, de manera sencilla, recubrimientos plásticos de objetos metálicos. El procedimiento consiste en fluidizar mediante aire partículas finas del material plástico con el que se desea recubrir la pieza. El objeto a recubrir se sumerge en el lecho, durante un corto periodo de tiempo y a una temperatura superior a la de fusión del plástico. De este modo las partículas se funden adhiriéndose a la superficie del metal, formando una fina capa sobre ella.

- Adsorción

Existen procesos continuos de adsorción mediante lechos fluidizados, a través de múltiples etapas que llegan a ser de gran efectividad. En dichos procesos, los componentes se adsorben de forma periódica con partículas de carbón activo y se eliminan posteriormente con vapor. Los ciclos de adsorción y desorción (regeneración del carbón activo) se llevan a cabo en el mismo lecho.



## INTRODUCCIÓN

- Secado de sólidos

Los secadores de lecho fluidizado se han empleado en gran número de aplicaciones industriales debido a su gran capacidad, bajo coste de construcción, sencillez de operación y alta eficiencia térmica. Son apropiados para secar cualquier tipo de sólido húmedo, siempre y cuando este pueda ser fluidizado por gas caliente. Comercialmente hablando, dentro de sus usos más frecuentes, están el secado de minerales, polímeros, arena, productos farmacéuticos o fertilizantes, siendo numerosos los diseños que se han desarrollado. Por ejemplo, las acerías utilizan grandes lechos para secar el carbón, antes de ser introducido en los hornos, así como las industrias farmacéutica y química emplean en sus procesos lechos de pequeño tamaño, pero muy eficientes.

### **1.1.8.2. Reacciones de síntesis**

Debido a la capacidad de los lechos fluidizados de mantener la temperatura uniforme en todo el lecho, éstos resultan más adecuados que los lechos fijos a la hora de desarrollar reacciones en fase gas con catalizadores sólidos. Con ellos se puede mantener un estricto control de la temperatura en la zona donde se produce la reacción. Además ofrecen elevadas superficies para el intercambio de calor.

### **1.1.8.3. Craqueo de hidrocarburos**

La rotura catalítica de hidrocarburos en elementos de menor peso molecular presenta dos particularidades: son reacciones endotérmicas y se produce deposición de carbono en la superficie de los sólidos cercanos. Estas características, junto con las grandes cantidades de material a tratar, determinan el tipo de proceso utilizado industrialmente para estas reacciones. Estos procesos se dividen en dos módulos: un primer módulo para la absorción de calor, la reacción y la deposición de carbono; y un segundo donde el carbono depositado se quema y se recupera el calor. Este calor se devuelve al primer módulo, mediante las propias partículas en recirculación, y se emplea para llevar a cabo la reacción. La única forma en que esto se puede desarrollar de manera eficiente es con un sistema de circulación de partículas mediante uno o más lechos fluidizados. Prácticamente todos los procesos en la actualidad se basan en este principio de operación.

- Craqueo catalítico fluido

En contacto con el catalizador adecuado, los hidrocarburos pesados en fase vapor se dividen en elementos de menor peso molecular. Son muchos los factores involucrados, siendo clave el modo en el que se suministra la gran cantidad de calor que se necesita para la reacción endotérmica y la forma de regenerar las partículas catalizadoras con efectividad y rapidez. El método de craqueo catalítico fluido (FCC, del inglés Fluid-Catalytic Cracking) lleva a cabo los puntos anteriores con sencillez, de modo que realiza simultáneamente la regeneración de las partículas catalizadoras y el suministro del calor de reacción.

## INTRODUCCIÓN

- Craqueo térmico

El proceso denominado craqueo térmico se lleva a cabo también utilizando lechos fluidizados, siendo su uso más común el de producción de etileno y propileno a partir de fragmentación de nafta procedente del petróleo, mediante reacciones altamente endotérmicas. Etileno y propileno sirven como elementos de partida en síntesis orgánicas y polimerizaciones. A pesar de haberse desarrollado procesos con sistemas de un solo lecho fluidizado, son los sistemas de dos lechos con recirculación de partículas los que suponen una operación de mayor éxito.

### 1.1.8.4. Combustión e incineración

- Combustión de carbón

Debido a la necesidad de encontrar un proceso de combustión para carbón de mala calidad o combustibles que no se pueden quemar en una caldera convencional de manera eficiente, comenzó a desarrollarse la combustión en lecho fluidizado (FBC, del inglés fluidized bed combustion), que acaparó la atención y esfuerzos de varias potencias tecnológicas con los crisis del petróleo de 1970s.

Un diseño típico es el basado en un lecho fluidizado burbujeante a presión atmosférica. En él, se fluidiza en primer lugar un lecho de partículas de caliza o dolomita mediante aire y, posteriormente, se van inyectando partículas pequeñas de carbón (de 3-6 mm).

Esta tecnología presenta la ventaja de reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  con respecto a otras de combustión de carbón pulverizado, ya que trabajan a menor temperatura.

- Incineración de residuos sólidos urbanos

La incineración de residuos sólidos urbanos es algo necesario en áreas pobladas. Para ello se suelen utilizar quemadores de parrilla, que resultan eficientes térmicamente, aunque en ocasiones presentan problemas debido a la emisión de fuertes olores. Estos problemas pueden ser evitados con incineradores de lecho fluidizado, que permiten quemar de forma eficiente combustibles de bajo poder calorífico y de alto contenido en cenizas, como es el caso de los residuos sólidos.

### 1.1.8.5. Gasificación

- Gasificación de carbón

La gasificación de carbón fue una de las aplicaciones con importancia de los lechos fluidizados en ámbito comercial. Este proceso ha sido muy utilizado para la obtención de gas combustible aunque, en ocasiones, se ha visto desplazado por la efectividad de otros combustibles como el petróleo o el gas natural.

## INTRODUCCIÓN

- Gasificación de residuos sólidos urbanos

Los residuos urbanos frecuentemente contienen materiales tóxicos y peligrosos. Por esta razón, en las plantas de incineración ordinarias es necesario implantar equipos para la limpieza de los gases de escape, de acuerdo con las exigencias medioambientales vigentes. No obstante, la limpieza asociada a los gases de combustión en plantas de gasificación resulta mucho más simple y económica debido a que el volumen de gas producido es menor que en los incineradores, resultando las plantas de gasificación ventajosas en el tratamiento de residuos tóxicos.

### 1.1.8.6. Activación de carbón

El carbón activado se utiliza para la adsorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas, para la separación de sustancias orgánicas, en recuperación de solventes y como catalizador en diversas reacciones químicas. En el proceso de activación del carbón la materia prima que se emplea es carbón, madera u otros residuos vegetales (como cascara de coco o cacahuete). La activación se divide en dos fases: la carbonización de los sólidos precursores y la activación o gasificación del carbonizado (que tiene lugar a una temperatura de 800 °C – 1000 °C). En la carbonización se eliminan elementos como  $H_2$  y  $O_2$  de los precursores, para formar un esqueleto carbonoso. Durante la gasificación el carbonizado se fluidiza con un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua o alguna combinación de estos) de manera que se eliminan los átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y la superficie específica.

### 1.1.8.7. Calcinación

Las partículas de caliza y dolomita se pueden calcinar de forma sencilla en un lecho fluidizado, quemando directamente combustible en el lecho. La reacción es altamente endotérmica, por lo que supone un elevado derroche de combustible.

### 1.1.8.8. Tratamiento de minerales

Los lechos fluidizados se emplean también para llevar a cabo ciertas reacciones de cara a modificar las características de algunos minerales.

Una aplicación es la de tostación para obtener metales a partir de sulfuros de mineral. La reacción en este caso se caracteriza por ser una oxidación levemente exotérmica, con lo que se suelen emplear lechos fluidizados de una sola etapa sin evacuación de calor o, en su caso, con una ligera refrigeración. Estas unidades requieren generalmente menor caudal de aire, con lo que se obtienen gases de escape con una concentración mayor de dióxido de azufre, lo que se debe tener en cuenta de cara a cumplir las pertinentes exigencias medioambientales.

También se emplean lechos fluidizados en la producción de silicio de elevada pureza para la fabricación de semiconductores y células solares. La obtención de silicio puro a partir de silicio de grado metalúrgico (tetracloruro de silicio) conlleva diversos pasos sobre los que se han desarrollado diferentes unidades de lecho fluidizado.

## INTRODUCCIÓN

La cloración o fluorinación de óxidos de metal es otra de las aplicaciones de los lechos fluidizados para la obtención de metal puro. Así por ejemplo, en la producción de titanio o zirconio se plantean estrictos requerimientos, por la alta temperatura de la reacción y la estanqueidad necesaria debida al tratamiento con cloro, que se pueden lograr con el uso de lechos fluidizados.

Otro desarrollo de los lechos fluidizados es la reducción de óxidos de hierro, para producir hierro y acero a partir de partículas de mineral de alto grado. Son varios los procesos que se han desarrollado sobre esta aplicación de los lechos fluidizados, comenzando por unidades de varias etapas hasta unidades donde la reducción se lleva a cabo de forma directa y con más eficiencia.

### **1.1.8.9. Cultivo de microorganismos**

El cultivo de microorganismos resulta ser una de las aplicaciones más peculiares de la fluidización. El cultivo de microorganismos en lechos fluidizados resulta más ventajoso que el cultivo convencional por diferentes motivos: mayor efectividad en el crecimiento de la superficie de los microorganismos, fácil transferencia de oxígeno lo que activa el metabolismo, eficiencia en la eliminación del calor y CO<sub>2</sub> generado por el metabolismo y facilidad para controlar temperatura, humedad y pH.

### **Referencias bibliográficas capítulo 2:**

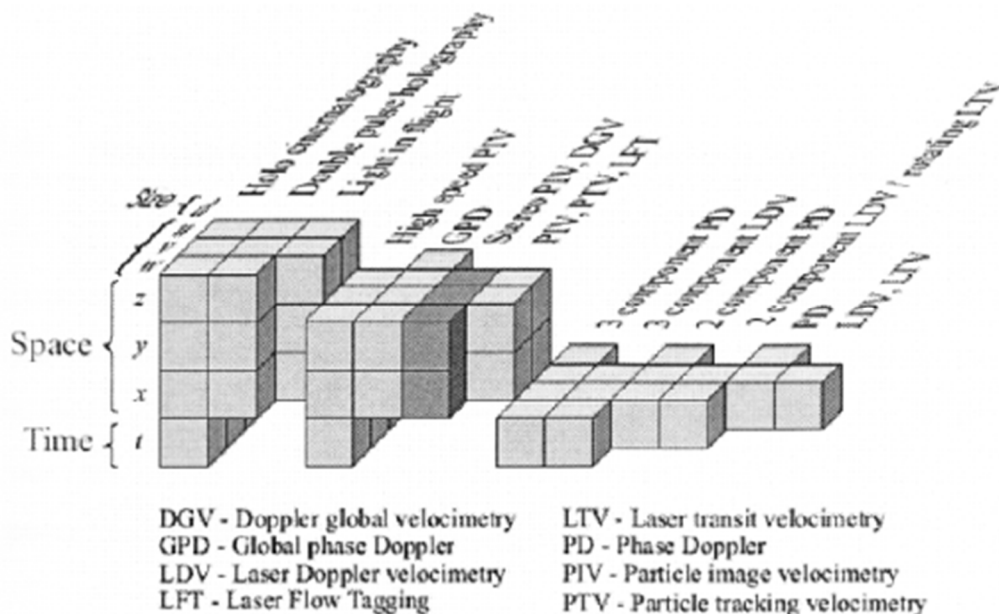
- [2] Apartado 2.1
- [3] Apartado 2.1, 2.4
- [4] Apartados 2.1, 2.2, 2.3, 2.6, 2.7, 2.8
- [5] Apartado 2.5
- [6] Apartado 2.6

## 1.2. CONCEPTOS PIV

### 1.2.1. Introducción

A partir del siglo XX se hizo necesario para el desarrollo tecnológico y científico el desarrollo de técnicas de medida capaces de obtener la distribución de velocidad de un determinado área de un campo fluido. Estas tecnologías abarcan desde técnicas intrusivas como tubo de Pitot o el anemómetro de hilo caliente que, por el hecho de ser intrusivas, presentan una serie de inconvenientes al generar perturbaciones en el flujo objeto de estudios hasta los métodos ópticos, no intrusivos (o mínimamente intrusivos si se han de introducir trazadores). Estas últimas implican grandes ventajas en el estudio de estructuras altamente sensibles a perturbaciones internas.

Los métodos ópticos son los más utilizados para la determinación del comportamiento del campo fluido y propiedades de las turbulencias en determinadas condiciones hidrodinámicas y aerodinámicas. Existen sistemas basados en la medida directamente de las partículas que integran el propio fluido (que son muy poco utilizados debido a su falta de precisión) y sistemas basados en la medida de partículas trazadoras inmersas en el fluido. De estos últimos cabe mencionar los velocímetros LTA / LTV (Laser Transit Anemometer / Velocimeter), basados en la medida del tiempo de vuelo; los LDA / LDV (Laser Doppler Anemometry / Velocimetry), basados en la medida del desplazamiento Doppler y, por último, los basados en la del espacio recorrido por las partículas trazadoras, PTV (Particle Tracking Velocity) si los desplazamientos se evalúan a partir de parejas de partículas individuales o PIV (Particle Image Velocimetry) si el desplazamiento se estima a partir de correlación estadística de un conjunto de partículas.



**Figura 9.** Diferentes técnicas de velocimetría ópticas [7].

## INTRODUCCIÓN

A medida que nos desplazamos a la izquierda en este diagrama, aumentan las prestaciones del sistema, pero también aumenta mucho la complejidad del sistema de medida y el coste de adquisición del material necesario.

El PIV es el utilizado en el presente proyecto y del que se hará una descripción de sus características y fundamentos. En concreto nos interesa su aplicación a lechos fluidizados, por lo que no se utilizará para medir el campo de velocidades de un fluido en sí, sino el de un lecho de partículas fluidizado.

El PIV fue propuesto en 1904 por Ludwig Prandtl, pero la imposibilidad, en esos años, de adquirir un número elevado de imágenes y de realizar un análisis suficientemente preciso, que permitiese la obtención de resultados cuantitativos además de cualitativos, llevó entonces a considerar esta técnica como un simple instrumento de visualización del campo de velocidades. Este sistema ha evolucionado enormemente como consecuencia de diversos avances tecnológicos. Destacan, por un lado, la evolución de los equipos informáticos (gran velocidad y capacidad de procesamiento) y, por otro lado, la aparición de sensores CCD con una resolución especial cada vez mayor.

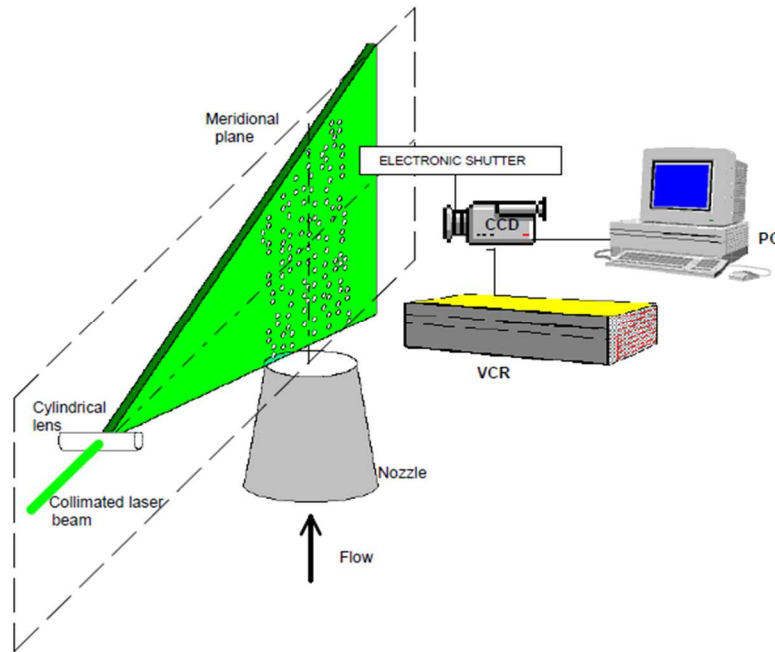
Para ilustrar esta técnica se comentan a continuación las dos fases principales de una medida hecha por PIV con tecnología digital.

- La primera es la fase de adquisición de las imágenes. Consiste en la adquisición de una zona del campo fluido en video digital o en imágenes fotográficas que, posteriormente se digitalizan. Las imágenes deben corresponder a una serie de fotogramas bajo unas determinadas especificaciones de los intervalos temporales que caracterizan la adquisición (tiempo de exposición y lapso entre imágenes). Las imágenes obtenidas proporcionan las posiciones sucesivas de las partículas durante su recorrido.
- La segunda fase consiste en el análisis de las imágenes obtenidas. Esta fase se realiza con el objeto de obtener el campo de desplazamientos y por lo tanto el campo de velocidad (siendo conocido el intervalo temporal entre dos fotogramas sucesivos. Tras lograr esto, es posible obtener otras magnitudes de interés para el estudio del flujo, como por ejemplo, la vorticidad y otras cantidades derivadas.

## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS

### INTRODUCCIÓN

El esquema típico de un sistema de medida PIV es el siguientes:



**Figura 10.** Esquema de un sistema de medida PIV [8].

En el esquema anterior las partículas son iluminadas con un haz de láser (se suelen utilizar tipo Nd:YAG), utilizando una lente cóncava cilíndrica para formar así el plano de iluminación. La luz dispersada por las partículas es grabada por cámaras CCD permitiendo así registrar las posiciones de cada partícula en cada pulso de iluminación. Como ya se ha comentado, en este proyecto las imágenes corresponden a un prototipo que simula un lecho fluidizado en 2D, por lo que no se ha utilizado láser, aunque se ha tenido en cuenta la iluminación.

#### 1.2.2. Fundamentos

El propósito del software de análisis es obtener medidas precisas del campo de velocidad para distintos flujos (laminares y turbulentos) en diversas condiciones dinámicas y geométricas. En esta sección se pretende dar una visión general de las operaciones que caracterizan un algoritmo de análisis de PIV.

A partir del intervalo de tiempo  $\Delta t$  entre las imágenes y del campo de desplazamientos  $\Delta x$  definido por la posición de las partículas en cada una de ellas, se pueden determinar los vectores de la velocidad  $u(x, t)$  como la media del desplazamiento de las partículas, es decir:

$$u(x, t) = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Además hay que tener en cuenta el factor de magnificación, que se puede calcular durante la fase de calibración, midiendo el número de píxeles que corresponde a una longitud conocida.

## INTRODUCCIÓN

Para determinar el desplazamiento de las partículas, que a su vez servirá para determinar la velocidad local del flujo, el método de análisis más comúnmente utilizado es la correlación estadística.

Dependiendo del tipo de adquisición, existen diversas maneras de computar el campo de vectores. En el caso de doble exposición, el desplazamiento de las partículas se puede registrar en una sola imagen expuesta dos veces ("single-frame") y en el caso de una sola exposición, una imagen se registra en fotogramas distintos ("multi-frame"). En el primer caso, hay que utilizar técnicas de auto-correlación (Adrian 1984 [10], Pickering y Halliwell 1984 [11]) para analizar el campo de desplazamientos, quedando una indeterminación sobre el sentido del desplazamiento. El caso de "multi-frame" se analiza con técnicas de correlación cruzada (Willert y Gharib 1991 [9]) que aportan información más completa (magnitud, dirección y sentido del desplazamiento), pero que necesitan de un equipo de adquisición más costoso para conseguir la velocidad de repetición adecuada.

Con las técnicas de correlación no se establece el desplazamiento de cada una de las partículas, sino que determina el desplazamiento más probable del conjunto de partículas contenidas en divisiones, normalmente cuadradas, distribuidas en forma de malla uniforme sobre la imagen de partículas. A cada una de estas divisiones se las llama "**ventanas de interrogación**".

### 1.2.3. Métodos de correlación

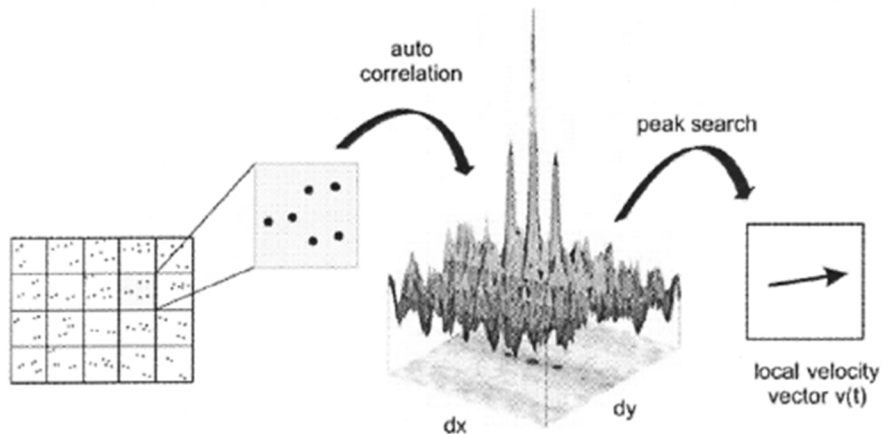
Existen dos métodos principales de correlación, la auto-correlación y la correlación cruzada.

#### 1.2.3.1. Auto-correlación:

En la auto-correlación, la imagen se correlaciona consigo misma ya que se trata de una imagen de partículas doblemente expuesta, es decir, consta de dos imágenes para cada partícula. Esta técnica se utilizaba cuando las cámaras CCD (Coupled Charge Device) no permitían descargar la imagen en un tiempo inferior a  $\Delta t$ .

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de auto-correlación de la imagen. La imagen completa adquirida por el sensor fotográfico digital (sensor CCD) se divide en una matriz de ventanas de interrogación, donde se realiza la correlación.





**Figura 11.** Ejemplo de auto-correlación en una imagen doblemente expuesta [12].

En la imagen pueden observarse tres picos, uno máximo primario, que indica el origen de la medida en el plano de correlación, y dos máximos secundarios situados simétricamente respecto al primero. La distancia del máximo primario respecto a los secundarios indica el desplazamiento de la partícula. Este hecho representa el mayor inconveniente de este método, ya que al presentar dos picos simétricos, no se sabe cuál de ellos corresponde al desplazamiento real de las partículas (problema denominado ambigüedad direccional).

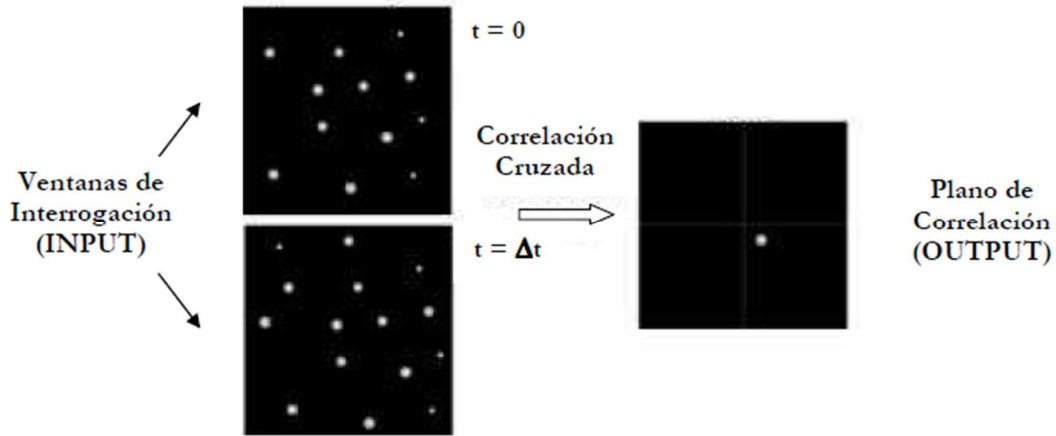
Este método es hoy en día una técnica en desuso gracias a los avances en cámaras digitales. La creación de cámaras CCD de doble capa (una de almacenamiento y otra de adquisición) permitió adquirir dos imágenes digitales en un intervalo de tiempo de hasta un microsegundo e hizo accesible la correlación cruzada.

#### **1.2.3.2. Correlación cruzada:**

La correlación cruzada consiste en efectuar la correlación entre las ventanas de interrogación de dos imágenes. Para ello se usa una magnitud estadística para medir el desplazamiento medio de cada grupo de partículas, esta magnitud es el coeficiente de correlación. La posición del pico de dicho coeficiente en el plano de correlación respecto al origen de este último indica el desplazamiento medio buscado. Se muestra un ejemplo de ventanas de interrogación y del correspondiente plano de correlación.

# VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS

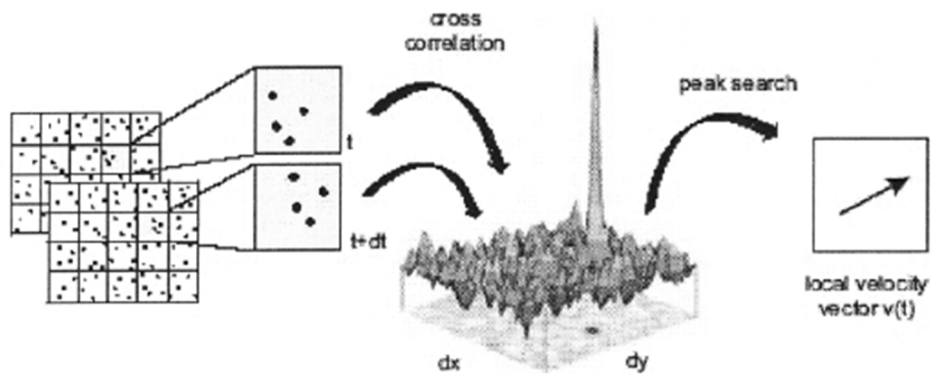
## INTRODUCCIÓN



**Figura 12.** Ejemplo de ventanas de interrogación y plano de correlación correspondiente [8]

Igual que para la auto-correlación, las imágenes de PIV se dividen en sub-zonas pequeñas (ventanas de interrogación) que permiten calcular el vector de desplazamiento correspondiente a cada pareja de ventanas usando técnicas estadísticas de correlación. Teóricamente, el tamaño de esta ventana debería ser tal que todas las partículas dentro de ella se hayan movido de manera homogénea (misma dirección, magnitud y sentido). Sin embargo, no puede reducirse mucho el tamaño de las ventanas porque se necesita una decena de partículas como mínimo para hacer una correlación correcta.

Para obtener el campo de desplazamientos de las imágenes adquiridas, se tiene que recurrir a la función de correlación cruzada. Tomando de ambas imágenes de PIV las dos ventanas correspondientes a una misma localización, se calcula la función de correlación espacial entre ellas. De esta última función se obtiene el coeficiente de correlación. El pico de dicho coeficiente permite obtener el desplazamiento buscado, que será el vector que, en el plano de correlación, identifica su posición.



**Figura 13.** Correlación cruzada para una ventana de interrogación [12].

Una vez subdividida la imagen en ventanas de interrogación, la expresión de dicha función de correlación cruzada  $R$  es [8]:

## INTRODUCCIÓN

$$R(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{a_I} \int I_1(x, y) \cdot I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy$$

Donde con  $a_I$  se indica el área de la ventana de interrogación, con  $I_1(x, y)$  la distribución de intensidad luminosa en la ventana relativa a la primera imagen de interrogación y con  $I_2(x, y)$  aquella relativa a la segunda.

Escrita de forma discreta esta ecuación queda:

$$R(s, t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_1^{i,j}(m, n) \cdot I_2^{i,j}(m - s, n - t)$$

Donde  $I_1^{i,j}$  denota la ventana de interrogación  $i, j$  en la primera imagen y  $I_2^{i,j}$  la ventana de interrogación en la segunda imagen.

En realidad esta expresión proviene de la distancia cuadrática Euclídea entre las dos ventanas de interrogación:

$$R_e(s, t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [I_1^{i,j}(m, n) - I_2^{i,j}(m - s, n - t)]^2$$

que, desarrollándola hacia el lado derecho, queda de la siguiente forma:

$$R_e(s, t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_1^{i,j}(m, n)^2 - 2I_1^{i,j}(s, t) \cdot I_2^{i,j}(m - s, n - t) + I_2^{i,j}(m - s, n - t)^2$$

Donde se puede apreciar que el primer término  $I_1^{i,j}(m, n)^2$ , es una constante ya que no depende de  $s$  y  $t$ . El último término  $I_2^{i,j}(m - s, n - t)^2$ , parece que depende de  $s$  y  $t$ , pero sólo es dependiente en la segunda imagen. Asumiendo que el patrón en  $I_2$  se distribuye uniformemente, de modo que la suma de  $I_2^{i,j}()$  no varía cuando cambian  $s$  y  $t$  podemos utilizar la ecuación de la correlación cruzada.

Conocida esta función, es posible calcular el coeficiente de correlación  $C$  definido como [8]:

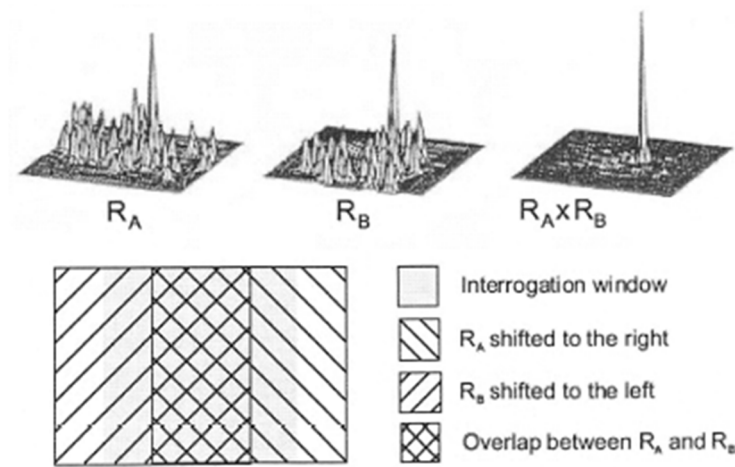
$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{R(\Delta x, \Delta y)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

Donde con  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  se indican las desviaciones estándar de las distribuciones de intensidad luminosa en la primera y en segunda ventana de interrogación respectivamente.

Existen algunos casos en los que se utiliza la ecuación de la distancia cuadrática Euclídea, pero la más ampliamente utilizada en métodos PIV es la de correlación cruzada ya que permite el uso de la FFT (*Fast Fourier Transform*) que disminuye el tiempo de ejecución.

#### 1.2.4. Correlación de segundo orden

Cuando los picos de segundo orden, provocados por el ruido, son del mismo orden de magnitud que el pico real dificultan enormemente la estimación de la posición de las partículas en el mapa de correlación. Para evitar este problema, se realiza una correlación de segundo orden, que consiste en un algoritmo que multiplica los mapas de correlación de dos ventanas levemente movidas de su posición inicial. Por ejemplo, se toma una imagen y se calcula su correlación a un 25 % a la izquierda de la original; y lo mismo a un 25 % a la derecha, con lo que obtenemos un solape del 50 %. En ambas correlaciones deben coincidir las posiciones de los picos de correlación, por lo que estas se multiplican, aumentando así la señal del pico real frente a posibles ruidos aleatorios, no correlacionados.



**Figura 14.** Correlación de segundo orden [12].

#### 1.2.5. La transformada rápida de Fourier o Fast Fourier Transform (FFT)

En general, no suele hacerse la correlación de forma directa, dado que resulta muy costosa en términos de tiempo de cálculo. Por ello que dicha función se calcula mediante el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier digital bidimensional (FTT: Fast Fourier Transform en inglés) sobre la imagen digital, como veremos a continuación.

La operación de correlación puede expresarse de la forma:

$$R(s_x, s_y) = I_1(x, y) \circ I_2(x + \Delta x, y + \Delta y)$$

Donde el símbolo  $\circ$  indica el operador de correlación (producto de convolución).

Para calcular la función de correlación cruzada es posible recurrir al teorema de Wiener-Khitchine [13], [14], según el cual hay una equivalencia entre la anti-transformada de Fourier de la densidad espectral de potencia y la función de correlación de la señal considerada. Aplicando este teorema, podemos pasar de la correlación en el plano espacial a una multiplicación en el plano de la frecuencia espacial, lo cual puede expresarse en la forma:

## INTRODUCCIÓN

$$g(x, y) \circ h(x, y) \Leftrightarrow G(\zeta, \eta) H^*(\zeta, \eta)$$

Donde las letras capitales representan las transformadas de Fourier de las funciones  $g$  y  $h$ ; y  $*$  representa el conjugado complejo:

$$\begin{aligned} F\{g(x, y)\} &= G(\zeta, \eta) \\ F\{h(x, y)\} &= H(\zeta, \eta) \end{aligned}$$

De forma que tomando transformadas de Fourier y haciendo uso de las propiedades del producto de convolución, obtenemos:

$$R(\Delta x, \Delta y) = F^{-1}\{F(u, v)G^*(u, v)\}$$

Donde  $F^{-1}$  expresa la transformada inversa de Fourier.

Esta metodología permite pasar de un numero de iteraciones iguales a  $O(N^4)$  (donde  $O$  significa del orden de) en el caso que se calcule la función de correlación cruzada, a un número de operaciones iguales a  $O(N^2 \log_2 N)$  si se aplica el teorema de Wiener-Khitchine [13], [14].

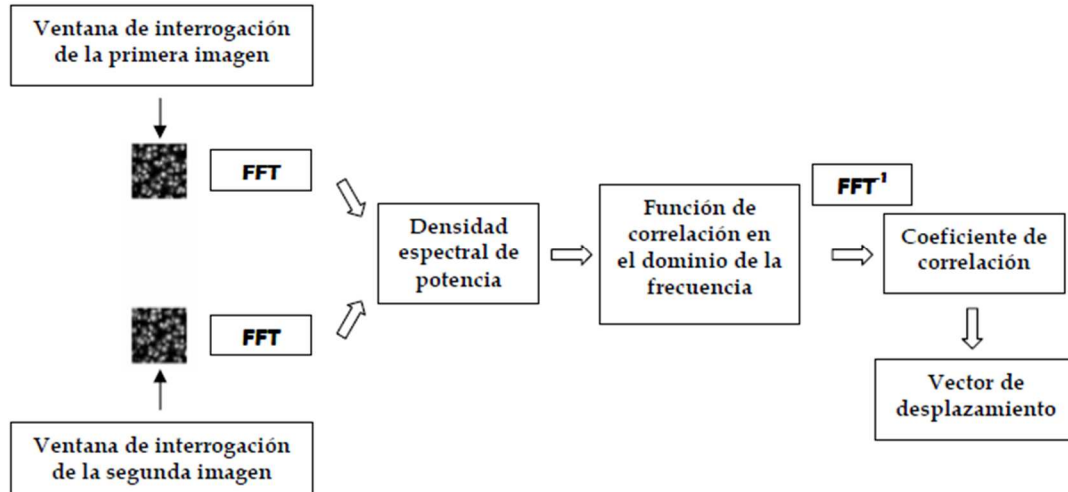
Sin embargo, el empleo de este teorema lleva algunas desventajas, el empleo de la FFT para el cálculo de la función de correlación cruzada introduce un mayor ruido con respecto a lo que habría si se empleara la función de correlación directa. De esta forma se causa, por lo tanto, una reducción de la relación señal/ruido. Tal comportamiento es debido a que la FFT trata la señal discreta como si fuese periódica, también cuando esta asunción no se corresponde con la realidad.

Pero tal reducción no es tan grande como para impedir la localización del pico de correlación (es por lo tanto posible identificar el vector de desplazamiento buscado) si se consideran las ventanas de interrogación de dimensiones suficientemente elevadas. Si las dimensiones son demasiado limitadas, el ruido introducido por la discontinuidad debida al FFT será elevado impidiendo la distinción entre los picos secundarios, debidos al ruido en el plano de correlación, y el pico principal, dado por la señal a medir.

En caso de estar en las condiciones para localizar el pico de correlación sin ambigüedad, el empleo de la FFT resulta particularmente favorable respecto a la correlación directa, por su mayor velocidad de cálculo.

El esquema del algoritmo a seguir durante la aplicación de FFT es el siguiente:

## INTRODUCCIÓN



**Figura 15.** Esquema de cálculo del desplazamiento [8].

### 1.2.6. Algoritmos “multi-grid”

Un problema recurrente es la pérdida de parejas de partículas entre dos ventanas de interrogación debido al movimiento de las mismas o bien a desplazamientos muy elevados dentro de una misma ventana de interrogación.

Para solucionar este problema, se usa el algoritmo “multi-grid”, consistente en reducir iterativamente el tamaño de las ventanas de interrogación. Se calcula en primer lugar el campo de desplazamientos en ventanas de interrogación grandes (por ejemplo, 128x128 píxeles). Estos desplazamientos se utilizan como predicción para ventanas más pequeñas. Este proceso se repite hasta alcanzar el tamaño de ventana deseado (32x32 píxeles, por ejemplo).

### 1.2.7. Interpolación sub-píxel

Hasta ahora se ha considerado suficiente, para calcular el desplazamiento buscado, localizar el pico de la función de correlación. Sin embargo, como todas las magnitudes utilizadas en un software de análisis de imágenes, también el coeficiente de correlación es una variable discreta, conocida solo en algunos puntos del plano de correlación, identificados por coordenadas enteras en píxel. La búsqueda del máximo de la función de correlación discreta proporciona como resultado un valor entero en píxel para las dos componentes  $x$  e  $y$  del vector desplazamiento. Tales valores no se corresponden, en general, con la localización exacta del pico del coeficiente de correlación, sino que con los valores enteros más próximos a los que interesan.

Para obtener una medida lo más precisa posible, es necesario recurrir a un estudio del coeficiente de correlación en el entorno del punto buscado y utilizar funciones interpoladoras que permitan la localización del máximo, considerando tal coeficiente como una función continua. Para esta labor la función utilizada es una Gaussiana, que es la que se suele postular que aproxima mejor la forma del coeficiente de correlación. Considerando que la distribución de la intensidad luminosa de las partículas en una imagen se puede aproximar a una función

## INTRODUCCIÓN

Gaussiana y que la correlación de esa función da como resultado siempre una función de ese tipo.

Se suele realizar de la siguiente manera (Raffel et. al, 1998 [15]):

$$x_0 = i + \frac{\ln C_{(i-1,j)} - \ln C_{(i+1,j)}}{2 \ln C_{(i-1,j)} - 4 \ln C_{(i,j)} + 2 \ln C_{(i+1,j)}}$$

$$y_0 = j + \frac{\ln C_{(i,j-1)} - \ln C_{(i,j+1)}}{2 \ln C_{(i,j-1)} - 4 \ln C_{(i,j)} + 2 \ln C_{(i,j+1)}}$$

Donde, con  $x_0$  y  $y_0$  se indican las coordenadas en píxel del desplazamiento buscado, con  $i$  y  $j$  fila y columna del plano de correlación correspondientes al valor máximo de la función de correlación y con  $C$  el valor del coeficiente de correlación en los puntos con coordenadas indicadas en el subíndice.

### 1.2.8. Pre-procesado y Post-procesado

Para el análisis de imágenes mediante PIV con el objeto de obtener los campos de desplazamiento de estas se pueden definir tres pasos principales. Con esto se pretende reducir el tiempo de cálculo y conseguir resultados caracterizados por un aumento de resolución espacial y precisión. Estos pasos son los siguientes:

1. La fase de *pre-procesado*, es decir la fase de tratamiento de las imágenes precedente el efectivo cálculo del campo de desplazamientos.
2. La fase de *procesado*, en la que se efectúa la estimación del campo de desplazamientos, seguida, gracias a la información sobre el tiempo entre imágenes, por el cálculo del campo de velocidad.
3. La fase de *post-procesado*, posterior al cálculo del campo fluido en sí y que permite mejorar los resultados, así como, obtener magnitudes derivadas como la vorticidad.

Hasta ahora se ha hablado de la fase de procesado pero en este apartado se pretende hablar sobre la fase inicial de *pre-procesado* y la fase final de *post-procesado*.

En las imágenes suelen aparecer reflexiones de luz, diferencias de iluminación o cualquier imprevisto que lleve a la formación de porciones de imagen no utilizables para la medida. Todo esto puede fácilmente generar, durante el cálculo del coeficiente de correlación, unos grupos de picos secundarios que pueden inducir un error en el cálculo del desplazamiento medio en la zona examinada. Como consecuencia de la presencia de estos picos secundarios se genera una reducción de la relación señal/ruido en el plano de correlación. Ello indica la posibilidad de que el algoritmo confunda el pico debido al ruido con el pico que se obtendría en caso de que se considerara solo la señal de las partículas, proporcionando un valor incorrecto del desplazamiento buscado. Si eso se repite en varios nodos de la malla de cálculo, se produce un aumento de porcentaje de vectores espurios (*outliers*) en el campo obtenido. En estos casos puede ser necesario recurrir a técnicas que incrementen la relación señal/ruido en el plano de correlación, a través de un pre-procesado de las imágenes. También se suelen aplicar filtros a

## INTRODUCCIÓN

las imágenes PIV que sean capaces de eliminar el ruido de baja y de alta frecuencia y, al mismo tiempo, de dejar inalteradas las imágenes de partículas. Sin embargo conviene resaltar que es conveniente cuidar la fase de adquisición ya que un tratamiento previo de las imágenes conlleva necesariamente una pérdida de información o bien una alteración, aunque pequeña, de la imagen del campo fluido.

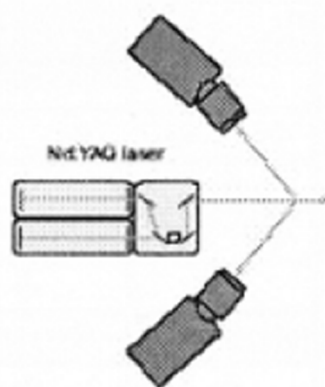
También se pueden aplicar filtros después del cálculo del campo fluido para mejorar los resultados, detectar y corregir vectores *outliers* y realizar cálculos sobre otras magnitudes relacionadas con la velocidad.

### 1.2.9. PIV estereoscópico

La velocimetría por imágenes de partículas, en su método clásico de PIV (2C-2D), tiene el gran inconveniente de que solamente es capaz de registrar las componentes de la velocidad contenidas en el plano de iluminación del láser, es decir, que es capaz de medir dos componentes de la velocidad (2C) a lo largo de un dominio bidimensional (2D). En este caso, velocidades fuera del plano no solo no pueden ser medidas, sino que, además, la componente de la velocidad perpendicular al plano de luz afecta la medida de las otras dos componentes con un error de proyección irrecuperable. Para flujos tridimensionales, este error puede llegar a causar errores significativos.

Una manera de obtener el sistema completo de componentes de la velocidad es utilizar una segunda cámara con otro ángulo de vista, técnica que se denomina PIV estereoscópico, o Stereo-PIV. Así, las dos cámaras orientadas en ángulo respecto a la perpendicular al plano láser, dan ahora dos puntos de vista de las partículas. Usando los dos ángulos de vista, se obtienen proyecciones del vector velocidad en dos planos diferentes. Es posible determinar las direcciones de proyección de ambas cámaras con una calibración, lo que permite recuperar información sobre la tercera componente y reconstruir el vector tridimensional, eliminando (o por lo menos reduciendo mucho) los errores de proyección.

Se muestra en la siguiente imagen un ejemplo de configuración típico de estéreo PIV:



**Figura 16.** Ejemplo de configuración de estéreo PIV [12].



## INTRODUCCIÓN

El ángulo de inclinación que forman las cámaras con respecto al haz láser provoca distorsiones no uniformes en las imágenes tomadas por las cámaras. Por dicho motivo, es necesario realizar un sofisticado proceso de calibración para obtener unos resultados adecuados. Dicha calibración permite pasar de los desplazamientos dentro del plano de la imagen a los desplazamientos ocurridos en el plano objeto (real). Esta transformación geométrica corresponde a una homotecia.

Al realizar esta calibración hay que hacer corresponder las relaciones geométricas entre el desplazamiento real de la partícula  $\Delta x = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$  con el desplazamiento proyectado  $\Delta S = (\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta X_2, \Delta Y_2)$  en el plano de la imagen grabada por cada cámaras, mediante unas relaciones geométricas.

### **Referencias bibliográficas capítulo 3:**

- [7] Apartado 3.1
- [8] Apartados 3.1, 3.2, 3.3, 3.6, 3.7, 3.8
- [9] Apartado 3.2
- [10] Apartados 3.9, 3.2
- [11] Apartado 3.2
- [12] Apartados 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6
- [13] Apartado 3.6
- [14] Apartado 3.6
- [15] Apartados 3.7, 3.9
- [24] Apartado 3.9

### **1.3. MOTIVACIÓN**

La fluidización es un proceso por el cual partículas de sólidos adoptan un estado similar al de un fluido quedando estas suspendidas en un gas o líquido. Ésta técnica posee características inusuales que resultan de gran utilidad en la ingeniería.

Son muchas las aplicaciones industriales en las que el uso de esta técnica permite un aumento de su eficiencia, las más importante son craqueo catalítico fluido (FCC), gasificación y combustión de combustibles sólidos, intercambios de calor u operaciones de secado, entre otras. Esto ha motivado numerosas labores de investigación dentro de la rama fluido-térmica de la ingeniería industrial a lo largo de la historia. Por lo tanto, existen numerosos modelos que describen el comportamiento de los lechos fluidizados con la intención de conocer las distintas variables que influyen. Dichos estudios no siempre han resultado una tarea fácil por lo que, en muchos casos se ha requerido la construcción de prototipos, simulaciones o métodos ópticos como rayos láser o tomografías con la idea de extrapolar los resultados experimentales a aplicaciones de nivel industrial.

El presente proyecto se centra en el uso de técnicas PIV con las que se obtiene información sobre el campo fluido evaluando parejas individuales de imágenes. En concreto se van a analizar prototipos de lechos fluidizados 2D, aunque también existen variantes de PIV en 3D como estéreo PIV. Se trata de un método de análisis no intrusivo con el que se puede obtener gran cantidad de información sobre el movimiento de las partículas que componen el lecho. Esto permite analizar las distintas zonas que se forman como la cúpula de la burbuja o de alta vorticidad.

#### **1.4. OBJETIVOS**

En la anterior sección se ha aclarado la importancia del desarrollo de la técnica de fluidización de lechos de partículas sólidas para su uso en la industria y las ventajas que ofrecen técnicas como el análisis PIV en su estudio. El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo una comparativa entre diferentes alternativas de software libre PIV desarrollados para MATLAB. En base a dicho objetivo principal se derivan los objetivos parciales que se detallan a continuación:

- La adaptación de los programas seleccionados para su uso en lechos modificando los códigos de los mismos para poder crear máscaras que excluyan del análisis zonas no deseadas.
- El análisis PIV varias parejas de imágenes pertenecientes a distintos casos de lechos fluidos 2D con los códigos previamente adaptados. Cada caso posee distintas características de interés y las imágenes se han seleccionado de manera que representen distintas situaciones del lecho.
- La comparación de las soluciones ofrecidas por los códigos tras el análisis de las parejas de imágenes, teniendo en cuenta aspectos cualitativos y el coste computacional. Se tendrán en cuenta distintas zonas diferenciables como cúpula de la burbuja principal o de alta vorticidad y el tiempo empleado en el análisis.
- La obtención de conclusiones determinando cuál de ellos es más adecuado para dicho uso y cómo varían los resultados en función de las características relativas a los casos estudiados.

## **2. INSTALACIONES EXPERIMENTALES**

Los equipos utilizados para la obtención de imágenes incluyen principalmente el prototipo de lecho fluidizado 2D, las partículas del lecho, el sistema de flujo de aire y el sistema de toma de imágenes.

En este proyecto se ha realizado el análisis de fotografías tomadas de varias instalaciones con distintas configuraciones.

A continuación se describen las características de los equipos utilizados para la obtención de imágenes para cada una de las configuraciones.

### **2.2. Instalación 1**

En este caso se ha utilizado un lecho fluidizado de dimensiones 0.3 m x 1 m x 0.01 m (anchura W, altura H y espesor Z). El lecho fue rellenado con partículas blancas de vidrio ballotini de 2500 kg/m<sup>3</sup> de densidad. Las partículas utilizadas en este caso son de tamaño medio: grupo B-D de la clasificación Geldart de 0.6-0.8 mm de diámetro. El distribuidor de aire se compone de una placa perforada con dos filas de 30 agujeros de 1 mm dispuestos en configuración triangular con 1 cm de paso. Las paredes delantera y trasera del lecho están fabricadas de vidrio y la pared trasera fue pintada de negro para aumentar el contraste en las imágenes frontales.

Se utilizaron dos focos de luz de 650 W para la iluminación del lecho. Las imágenes fueron tomadas con una cámara de video de alta velocidad Redlake Motion pro X3, obteniendo imágenes de la vista frontal del lecho a 125 fps.

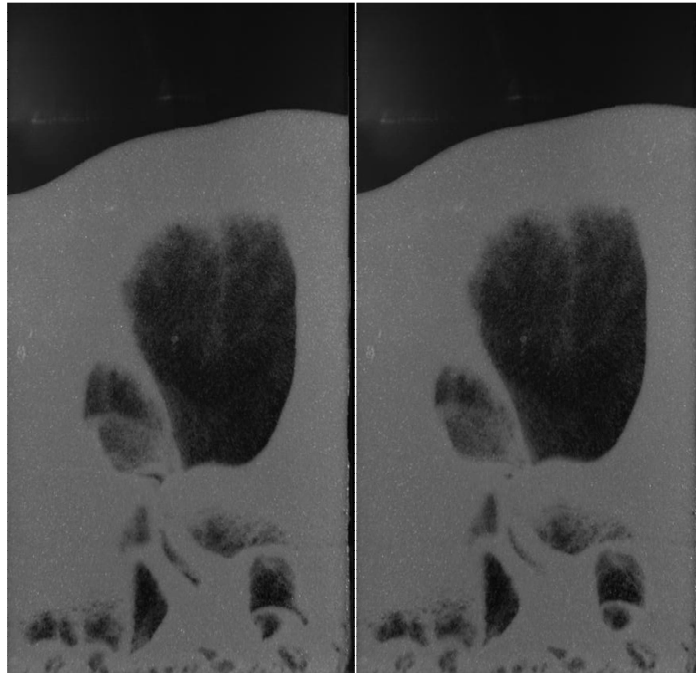
El error de discriminación entre las fases de burbuja y densa en las imágenes digitales obtenidas está directamente relacionado con la resolución espacial de la imagen, es decir, el tamaño de un pixel, que es 0.6834 mm.

De cada una de las instalaciones experimentales se ha obtenido un caso distinto para su análisis y de cada caso se han analizado tres parejas de imágenes distintas. Las parejas de imágenes se han elegido de tal modo que la burbuja aparezca en distintas fases de crecimiento para que, de este, modo la comparativa sea más amplia.

Se muestran a continuación las parejas de imágenes seleccionadas para que se pueda apreciar la evolución del lecho en cada una de ellas.

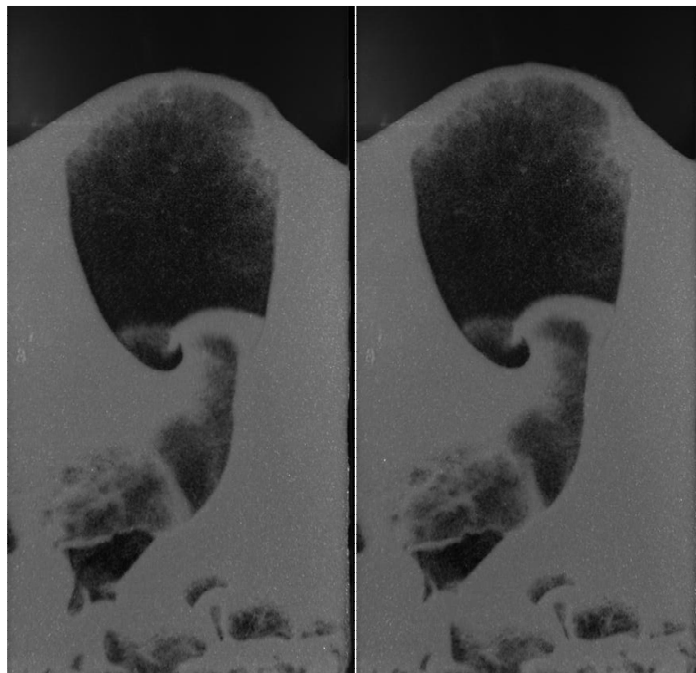
## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS INSTALACIONES EXPERIMENTALES

La primera pareja de imágenes representa una situación normal del lecho en la que la burbuja todavía no está muy desarrollada.



**Figura 17.** Primer par de imágenes caso 1.

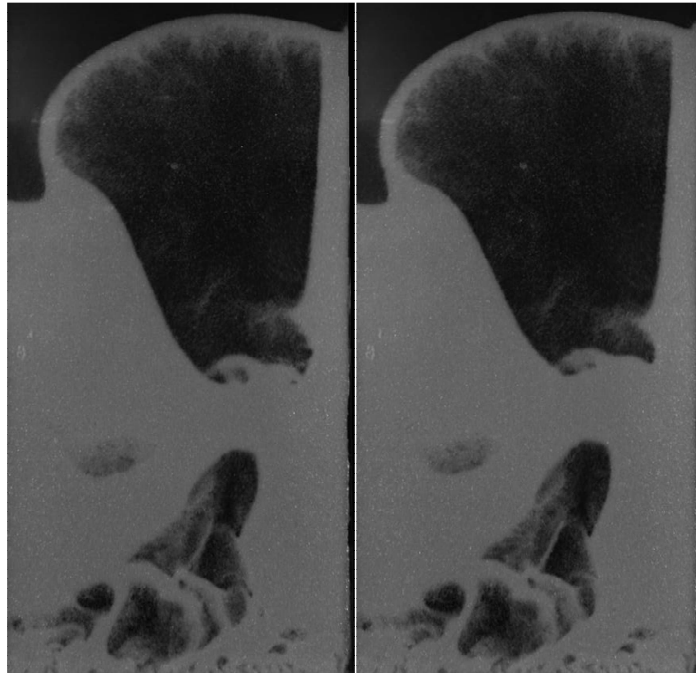
En este segundo par la burbuja es muy grande y la capa de partículas superior a la cúpula de la misma es más fina. También existe una zona de alta vorticidad formada en la parte inferior de la burbuja.



**Figura 18.** Segundo par de imágenes caso 1.

## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS INSTALACIONES EXPERIMENTALES

En este último par la burbuja está a punto de erupcionar y la capa de partículas de la parte superior es aún más fina que en la pareja anterior.



**Figura 19.** Tercer par de imágenes caso 1.

Analizando el par de imágenes tomando como referencia la sonda del prototipo y conociendo la separación temporal que hay entre ellas se ha calculado una velocidad en la cúpula de la burbuja de 68.34 cm/s para la cúpula de la burbuja en el primer par, 59.79 cm/s en el segundo y 42.71 cm/s en el tercer par.

### **2.3. Instalación 2**

El lecho fluidizado para esta instalación es el mismo que el descrito en la instalación 1. Pero, en este caso, solo se ha insuflado aire por el lado izquierdo, por lo que en el lado derecho las partículas se amontonan y se crea una zona en la que no hay movimiento. El sistema de flujo de aire es el mismo que el utilizado en la instalación anterior.

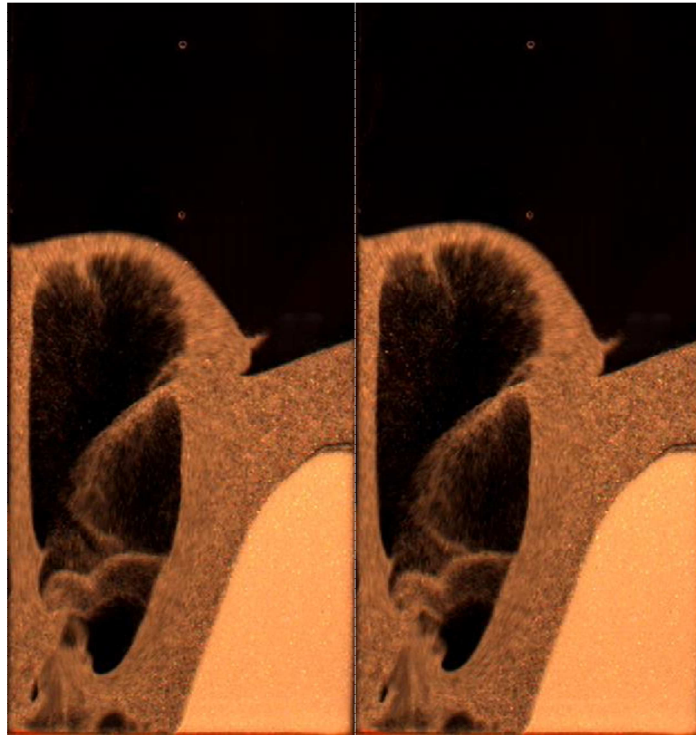
Se introdujeron partículas adicionales de diferente color, tras un tiempo con el lecho en funcionamiento, para mejorar el análisis PIV. Esas partículas son conocidas como partículas trazadoras, que en una masa homogénea de partículas son fáciles de seguir y, por tanto, dan información del comportamiento fluido de partículas individuales. Las partículas trazadoras solo se diferencian en el color de las partículas iniciales, todas las otras características como la densidad o la forma son iguales. La cantidad de partículas trazadoras tiene que ser menor que la cantidad de partículas iniciales, de lo contrario las partículas iniciales toman el papel de las trazadoras. Por lo tanto la función de dichas partículas es proporcionar un mayor contraste entre fases. El tamaño de las partículas es el mismo que en la instalación anterior

Para la toma de imágenes se ha utilizado una cámara digital Basler A640 a 100 fps. Se utilizaron los mismos focos de iluminación que en la instalación 1. La resolución espacial de la imagen, es decir, el tamaño de 1 pixel es de 0.9615 mm. Por lo tanto, en este segundo caso se analizarán imágenes con menor resolución y se estudiará su influencia en los resultados.

Se muestra a continuación las tres parejas elegidas para el análisis con los diferentes códigos.

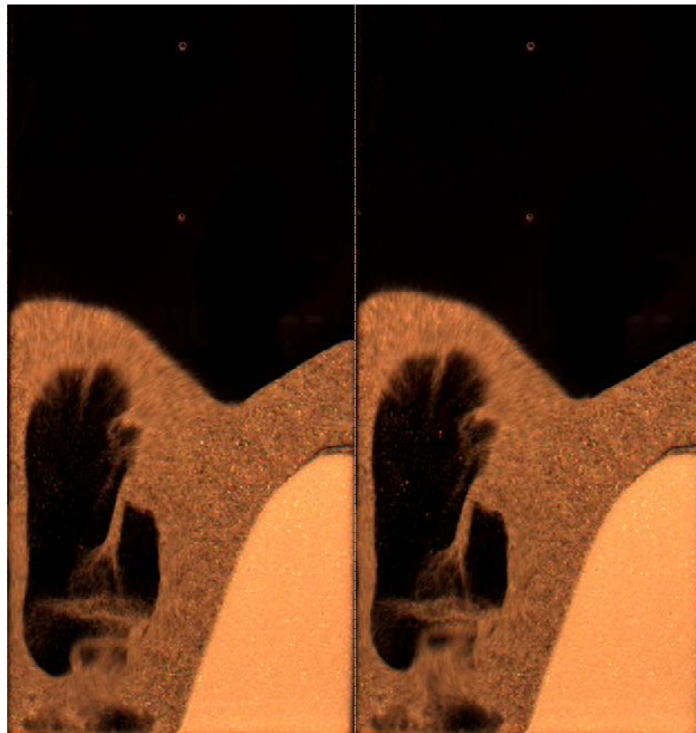
## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS INSTALACIONES EXPERIMENTALES

En la primera pareja de imágenes se ha escogido porque la burbuja está muy desarrollada y presenta una cúpula muy fina.



**Figura 20.** Primer par de imágenes caso 2.

Este segundo par representa una situación normal en la que la burbuja tiene un tamaño medio y está en estado de crecimiento.

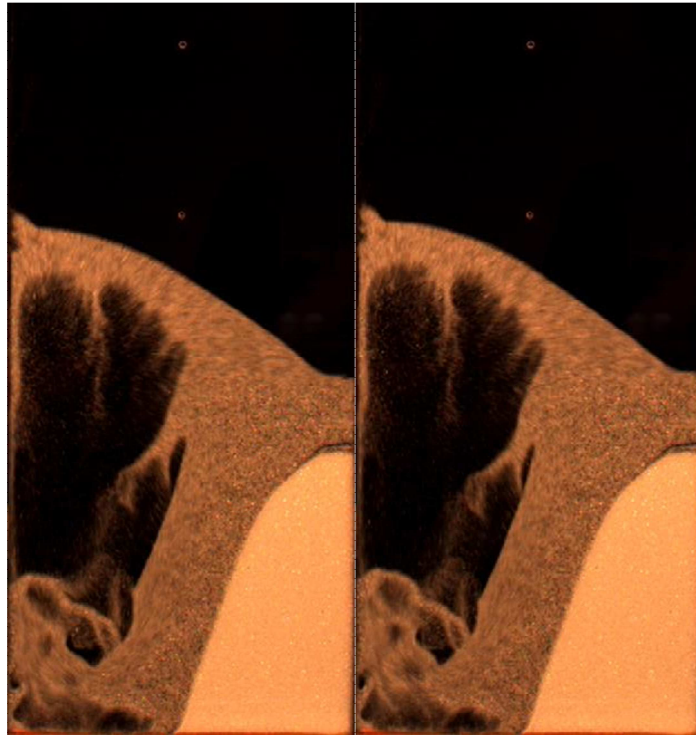


**Figura 21.** Segundo par de imágenes caso 2.



## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS INSTALACIONES EXPERIMENTALES

El tercer par de imágenes fue seleccionado porque contiene una burbuja de gran tamaño con una zona de alta vorticidad en la zona inferior del lecho.



**Figura 22.** Tercer par de imágenes caso 2.

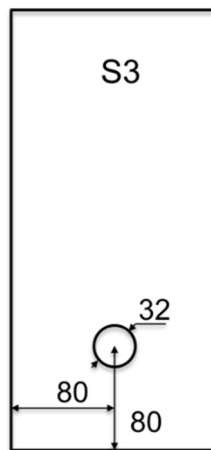
Del mismo modo que en el caso anterior, se ha calculado una velocidad en la cúpula de la burbuja de 86.54 cm/s para la cúpula de la burbuja en el primer par y 76.92 cm/s en el segundo y tercer par.

## 2.4. Instalación 3

El lecho utilizado en esta instalación tiene un tubo circular inmerso con una altura  $H$  de 340 mm y una anchura  $W$  de 160 mm. Para reducir la atracción entre paredes y partículas, el lecho está construido de vidrio acrílico antiestático. Las paredes laterales se construyeron teniendo en cuenta el tamaño de partícula. Al igual que en las otras instalaciones experimentales, la pared trasera fue pintada de negro para aumentar el contraste.

Todas las uniones entre placas fueron con pegamento para asegurar el lecho de partículas y las conexiones al sistema de flujo de aire. Para detectar fugas, el lecho de partículas fue rellenado con agua para observar cualquier salida de flujo.

El tubo insertado tiene un diámetro de 32 mm y está unido con pegamento a las placas del lecho.



**Figura 23.** Esquema lecho instalación 3.

Las partículas escogidas son de vidrio soda-lime con una densidad de  $2500 \text{ kg/m}^3$ , que generalmente se utilizan como relleno o para la construcción de carreteras, su un tamaño que varía entre 1 y 1.3 mm.

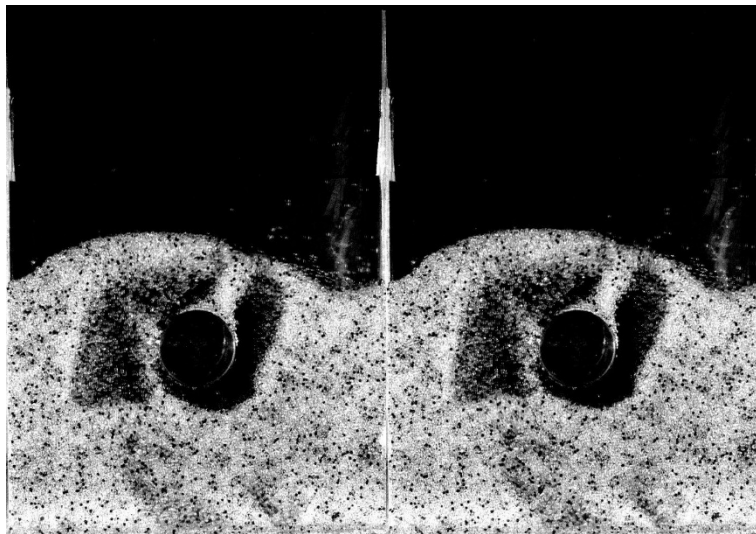
También se introdujeron partículas trazadoras de color negro, lo que supuso un problema en la creación de la máscara. Debido a ello, hubo que variar el umbral del intensidad de la imagen para definir el nivel a la hora de convertirla a escala de grises.

Las imágenes fueron tomadas con una cámara de vídeo de alta velocidad. La cámara fue colocada lo más cerca posible al lecho fluidizado para obtener la mejor resolución posible. Se utilizaron dos focos de luz en diagonal al lecho de partículas. La apertura, el enfoque y la posición de la cámara fueron establecidos directamente, el resto de los parámetros se regularon por ordenador. Fue necesario rotar y recortar las imágenes para eliminar entorno no deseado. Las imágenes analizadas tienen una resolución espacial de 0.2276 mm, por lo que son las que mejor resolución de los tres casos.

## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS INSTALACIONES EXPERIMENTALES

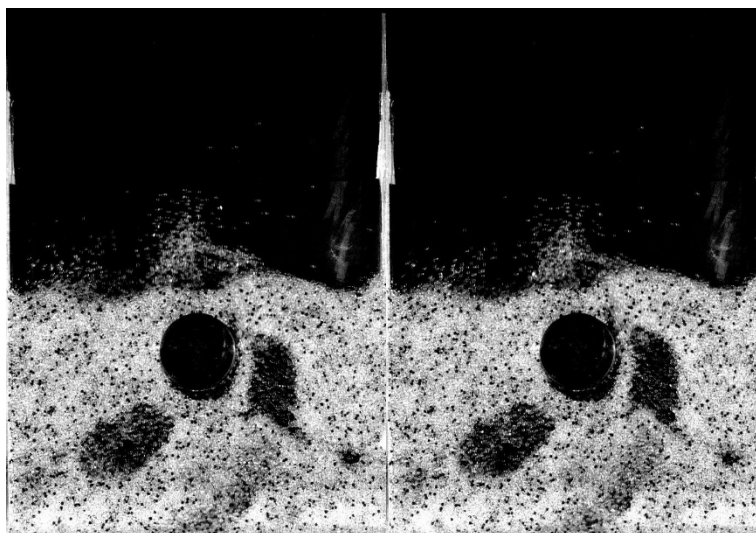
En el caso 3, correspondiente a la tercera instalación, resulta de gran interés el estudio que se realizará sobre la influencia en el análisis PIV de objetos inmersos en el lecho. La presencia del tubo en el lecho también influye en el comportamiento dinámico de las partículas, por lo que las situaciones son bastante diferentes que en los casos anteriores. Se muestra en las siguientes figuras las parejas seleccionadas para su análisis.

El primer par se ha escogido porque representa una situación normal en la que las dos burbujas están en fase de crecimiento y se ha formado una zona con ausencia de partículas en la parte inferior del lecho que resulta bastante común a lo largo de las imágenes tomadas de este lecho en funcionamiento.



**Figura 24.** Primer par de imágenes caso 3.

El segundo par presenta dos burbujas en el inicio de su formación, justo después de la erupción de las burbujas que se hubieran formado antes como se puede apreciar por las partículas todavía dispersas encima del lecho fruto de dicha erupción.

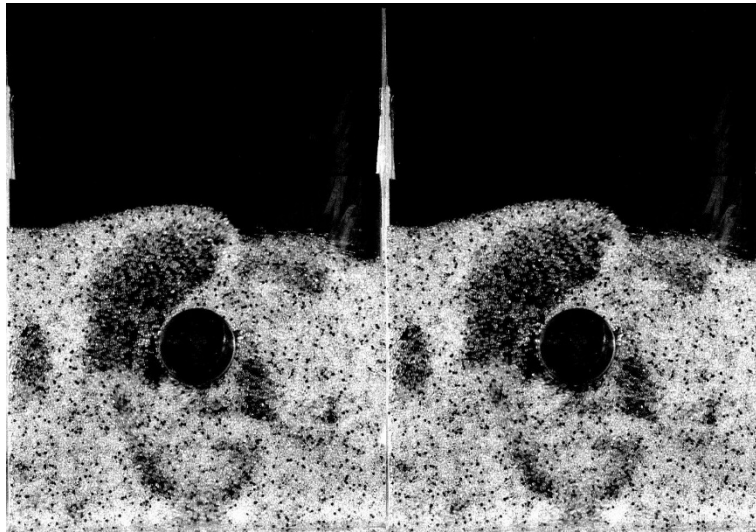


**Figura 25.** Segundo par de imágenes caso 3.

## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS

### INSTALACIONES EXPERIMENTALES

Y la tercera pareja se ha elegido porque tiene una burbuja principal muy desarrollada que está punto de entrar en erupción, además existen zonas en la parte inferior del lecho con movimientos de alta vorticidad.



**Figura 26.** Tercer par de imágenes caso 3.

Se ha calculado una velocidad en la cúpula de la burbuja de 31.86 cm/s para la cúpula de la burbuja en el primer par, 45.52 cm/s en el segundo y 31.86 cm/s en el tercer par.

La siguiente tabla resume los parámetros de las instalaciones utilizadas:

Parámetro		Instalaciones 1 y 2	Instalación 3
Altura Lecho, H (m)		1	0.34
Anchura Lecho, W (m)		0.3	0.16
Espesor Lecho, Z (m)		0.01	-
Densidad Partículas, $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )		2500	2500
Partículas Medianas	$d_p$ (mm)	0.6-0.8	-
	$U_{mf}$ (m/s)	0.44	-
Partículas Grandes	$d_p$ (mm)	-	1-1.3
	$U_{mf}$ (m/s)	-	0.67

**Tabla 2.** Parámetros instalaciones experimentales.

### 3. CÓDIGOS UTILIZADOS

Se han utilizado seis códigos distintos para llevar a cabo comparaciones entre ellos, objeto del presente proyecto.

Una de las mayores cuestiones a tener en cuenta a la hora de utilizar códigos PIV en aplicaciones de lecho fluidizado es excluir las zonas donde se forman burbujas del análisis. Al comienzo de este proyecto se contaba con un código para generar máscaras automáticamente para cada fotograma. El generador automático de máscaras se desarrolló utilizando un código de matPIV en el que se generaba una máscara de una región que el usuario seleccionaba basándose en la intensidad de la escala de grises de la imagen convertida en blanco y negro. La fase de negro define el fondo, tubos sumergidos y la fase de burbuja y la fase en blanco define la fase sólida del lecho. Con este código se han generado todas las máscaras de los casos utilizados.

La utilización de estas máscaras en los códigos matPIV 1.6 y matPIV 1.7 no fue un gran problema ya que se generó a partir de un código propio. Tampoco supuso gran dificultad adaptar PIVlab y PIVsuite para utilizar la máscara ya que, como la mayoría de los códigos, están pensados para excluir ciertas regiones del cálculo. El código más difícil para adaptar para el uso de la máscara fue mPIV ya que no está preparado para el uso de máscaras y tiene una mayor complejidad estructural con diferentes módulos.

En el caso de openPIV se trata de una parte extraída de la versión GUI del mismo y, posteriormente, se ha adaptado para el uso de máscaras. Se trata de un código de gran simplicidad, en comparación con el resto, que sólo realiza un paso en cada análisis. Debido a esto, no se han obtenido muy buenos resultados, sobre todo en las imágenes de menor calidad. Por ello únicamente se han realizado análisis del tercer caso con este código.

De los códigos matPIV se han utilizado, en los casos que ha mejorado el análisis, algunos filtros de post-procesado con la intención de eliminar vectores espurios (outliers). Del mismo modo se utilizó el pre-procesado de PIVlab en los casos en los que se pudo observar una mejora en el análisis. Esta ha sido una tarea delicada ya que en algunas situaciones, a pesar de que se eliminan algunos vectores outlier, el uso de post-procesado afectaba negativamente a los resultados a nivel cualitativo.

En todos los casos solape (“overlap”) utilizado es del 50%.

Como ya se ha comentado anteriormente, algunas imágenes han requerido ser cortadas y rotadas antes del análisis.

### 3.2. matPIV 1.6

Es un código desarrollado por Kristian Sveen, profesor del departamento de matemáticas en la Universidad de Oslo. Se trata de uno de los códigos de análisis PIV más antiguo y uno de los más ampliamente utilizados. La versión 1.6 fue publicada en 2004 como código abierto para MATLAB [1].

Este código ofrece muchas opciones a la hora de elegir un método de análisis, son las siguientes [16]:

- 'single' – Realiza una sola iteración utilizando correlación cruzada
- 'multi' – Realiza tres iteraciones con correlación cruzada. Comienza por un tamaño de ventana especificado y la iteración final utiliza la mitad del tamaño de ventana con el que se ha comenzado.
- 'multin'. – Es una extensión de 'multi' que realiza  $n$  iteraciones.
- 'mqd' – Realiza cálculo PIV con un solo paso utilizando el método de las diferencias cuadráticas desarrollado por Gui y Merzkirch (2000) [19] y [20].
- 'norm' – Un paso con correlación cruzada normalizada [16]. En este método utiliza una función de MATLAB llamada *normxcrr2.m*.

El método de análisis que se ha elegido en este trabajo ha sido 'multin' que, al igual que 'single' y 'multi', utiliza FFT (Transformada Rápida de Fourier) que permite realizar análisis más rápidos. En cada paso se ha ido reduciendo el tamaño de ventana a la mitad, por lo que se trata de un algoritmo "multi-grid", la configuración de los tamaños para cada caso se detalla al final de este capítulo. Además, utiliza interpolación sub-píxel con el método de la gaussiana definido en la introducción (de Raffel et. Al 1998 [15]) seleccionado por defecto, pero también permite el uso de otros métodos: centroide y parabólico.

Este código utiliza una serie de filtros, utilizados tras realizar los cálculos, para eliminar vectores espurio (*outlier*). Los filtros reemplazarán los vectores espurio por NaN (Not a Number). Dichos filtros son los mismos que se utilizan en el **post-procesado** mencionado anteriormente. Son los siguientes:

1. *Signal-to-Noise ratio*. A parte del campo de velocidades, el programa puede devolver la matriz SnR para la validación del campo vectorial. Los vectores con un valor SnR inferior al especificado son reemplazados por NaN.
2. *Peak height*. También tiene la opción de devolver Pkh y funciona del mismo modo que el filtro SnR. Este filtro no se utiliza en el post-procesado, pero sí lo utiliza el programa durante el análisis.
3. *Global*. Elimina los vectores que son significativamente más grandes o más pequeños que la mayoría.

## CÓDIGOS UTILIZADOS

4. *Local*. Incorpora dos filtros: uno de mediana y otro de media. Filtran los vectores de velocidad basándose en la diferencia cuadrática entre un vector y la mediana o la media de sus vecinos de alrededor.

Tras los filtros descritos se utiliza una función interpoladora de outliers llamada *naninterp* que puede utilizar dos métodos ligeramente diferentes: *'linear'* y *'weighted'* (lineal y ponderado). Por defecto se utiliza el método *'linear'*, que clasifica todos los vectores espurio basándose en el número de vecinos espurio y comienza interpolando el vector que tiene menos vecinos espurio realizando un bucle hasta que no queden NaN's.

### 3.3. matPIV 1.7

Se trata de la versión 1.7 del código de Kristian Sveen, desarrollada en 2014. El mayor cambio que presenta frente a la versión anterior es un nuevo método de iteración variando el dominio de Fourier basado en los trabajos de Qian y Cowen (Exp Fluids 2005).

**Referencias bibliográficas códigos matPIV 1.6 y matPIV 1.7:** [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26] y [27]

### 3.4. mPIV

Contiene una serie de herramientas PIV escritas en Matlab por Nobuhito Mori, de la universidad de Osaka (Japón), y Kuang-An Chang, de la Universidad de Texas A&M (USA), para estudiantes e investigadores. En este trabajo se ha utilizado la versión 0.961 del año 2004.

Este código propone tres métodos de correlación:

- *Super-resolution algorithm*. Método jerárquico.
- *Cross-correlation method*. Método de correlación cruzada.
- *'MQD' method*. Método que utiliza la diferencia cuadrática mínima.

Se ha utilizado el método *'MQD'* de manera recursiva reduciendo los tamaños de ventana a la mitad en cada paso, por lo que se trata de un algoritmo "multi-grid".

Tiene dos métodos de filtrado para eliminar *outliers*:

- *Local median filtering*.
- *Global filtering*.

Se pueden seleccionar tres formas para interpolar tras los filtros:

- *Linear method*.
- *Spline method*. Utiliza splines cúbicos.

## CÓDIGOS UTILIZADOS

- *Kriging method*. Uno de los requerimientos de mPIV son las herramientas de procesamiento de imágenes DACE (Design and Analysis of Computer experiments) Toolbox [32] y [33] de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU), que son necesarias para el uso de este método.

El método de interpolación tras los filtros que se ha utilizado en los dos primeros casos es *kriging*, pero en el caso 3 devolvía muchos NaN y se cambió a *spline*.

Realiza interpolación sub-píxel con el método de la gaussiana.

**Referencias bibliográficas códigos mPIV:** [9], [10], [15], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39] y [40]

### 3.5. openPIV

Es un software escrito en Matlab, Python y C++ para análisis PIV. Combina el know-how de varios desarrolladores basándose en tres paquetes más antiguos: URAPIV, PyPIV y URAPIV-C++. Fue desarrollado por Taylor Z.J., Gurka R., Kopp G.A. y Liberzon A. en 2010.

Como ya se ha comentado, en este proyecto se ha utilizado una parte de la versión GUI de openPIV en la que analizaba una pareja de imágenes ya que el código es complicado y utiliza funciones *handle*. Lo que se ha intentado es extraer únicamente la parte del código que realiza el análisis PIV.

Dicho esto, se trata de un código que utiliza correlación cruzada con FFT (a través de la función `fft2.m` de MATLAB) con interpolación sub-píxel, pero no se trata de un algoritmo “multi-grid” ya que no es recursivo.

**Referencias bibliográficas códigos openPIV:** [41]

### 3.6. PIVlab

Herramienta de análisis PIV para Matlab desarrollada por William Thielicke y Eize J. Stamhuis. En este trabajo se ha utilizado la versión 1.35 de Junio de 2014.

Permite dos métodos de análisis PIV:

- DCC (*Direct cross correlation*). Mediante correlación cruzada directa.
- DFT (*Discrete Fourier transform*). Calcula la matriz de correlación en el dominio de la frecuencia utilizando FFT (Fast Fourier Transform), reduciendo el tiempo de análisis.



## CÓDIGOS UTILIZADOS

En este trabajo se ha utilizado el método DFT de manera recursiva. También se trata de un algoritmo multigrad.

El código utiliza interpolación sub-píxel con una función gaussiana bidimensional de 9 puntos de ajuste.

Como se ha comentado anteriormente, este código contiene un **pre-procesado** que se ha utilizado en los casos que ha contribuido a la mejora del análisis. Contiene una serie de técnicas que se describen a continuación:

- CLAHE (Contrast limited adaptive histogram equalization). Ecualización de histograma adaptativo de contraste limitado. Mejora significativamente la probabilidad de detectar vectores válidos en un  $4.7 \pm 3.2$  %.
- *Intensity highpass*. Filtro de paso alto que principalmente conserva la información de alta frecuencia de la iluminación de las partículas, suprimiendo alguna información de baja frecuencia (incluyendo toda la información de desplazamiento de baja frecuencia).
- *Intensity capping*. Selecciona un límite superior de la intensidad en escala de grises y todos los píxeles que superan este umbral se sustituyen por este límite. Mejora la probabilidad de detectar vectores válidos en un  $5.2 \pm 2.5$  %.
- También existe la posibilidad de utilizar el filtro adaptativo de paso bajo wiener2.m de MATLAB.

**Referencias bibliográficas códigos PIVlab:** [42], [43] y [44]

### 3.7. PIVsuite

Paquete para medida de campos de velocidades mediante técnica PIV desarrollado por Jiri Vejrazka del Instituto de Procesos Químicos Fundamentales de la Academia de Ciencias de la República Checa (Praga). Este software está inspirado en PIVlab de William Thielicke.

PIVsuite ofrece una gran variedad de opciones de configuración. Todos los parámetros configurables se pueden introducir como un escalar o como un vector. Si se introducen como un escalar, se aplican a todos los pasos. Y si se introducen como un vector el parámetro cambia en cada paso. Debido a su complejidad se han utilizado los parámetros por defecto.

El método de correlación que utiliza por defecto es 'fft' en el que utiliza correlación cruzada usando transformada de Fourier en las primeras iteraciones y un método llamado 'dcn', que utiliza correlación cruzada evaluada usando convolución, en los últimos pasos. También se trata de un algoritmo "multigrad" con interpolación sub-píxel.

**Referencias bibliográficas códigos PIVsuite:** [45]

Para cada caso analizado, se han utilizado diferentes configuraciones en cada uno de los códigos utilizados. Como ya se ha comentado, se ha utilizado el pre-procesado de matPIV 1.6 y el post-procesado de PIVlab en los demás códigos si éstos han supuesto una mejora en los resultados. Además, dependiendo de la resolución de las imágenes se ha llegado a tamaños de ventana de interrogación distintos y, dependiendo de las características de recursividad de cada programa se han realizado un número concreto de pasos. De todos los filtros que componen el post-procesado anteriormente mencionado, uno de ellos que utiliza el valor SNR (Signal to Noise Ratio) no se ha podido aplicar al código PIVlab ya que este no devuelve dicho parámetro. Se detalla a continuación las configuraciones para cada caso:

- **CASO 1**

En el primer caso todos los códigos utilizados (excepto mPIV) han realizado dos pasos por cada tamaño de ventana, comenzando por un tamaño de 64 px y terminando con un tamaño de 32 px. El programa mPIV realiza un primer paso de chequeo con un tamaño de 64 px, y luego tres más de tamaños 64, 64 y 32 px, por lo que en total realiza 4 pasos. En la siguiente tabla se especifica el uso de pre-procesado y post-procesado:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Pre-procesado</b>	-	-	ok	ok	-
<b>Post-procesado</b>	ok	ok	ok	ok	ok

**Tabla 3.** Configuración códigos caso 1

- **CASO 2**

Para el caso 2 se ha comenzado con tamaños de ventana de 64 px y se ha terminado con tamaños de 16 px, realizando dos pasos por cada tamaño siendo seis pasos en total, excepto para matPIV 1.7 y PIVlab. Con el código matPIV 1.7 solo se ha realizado un paso para el tamaño de ventana de 16 px, por lo que se han realizado 5 en total. Y con PIVlab se ha realizado el primer paso con tamaño de 64 px, el segundo con un tamaño de 32 px y los dos últimos con tamaño de 16 px. Se resume a continuación el uso de pre-procesado y post-procesado:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Pre-procesado</b>	-	-	ok	ok	-
<b>Post-procesado</b>	ok	ok	ok	ok	ok

**Tabla 4.** Configuración códigos caso 2

VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS

## CÓDIGOS UTILIZADOS

- **CASO 3**

En este caso se añade a la lista de programas el código openPIV, que solo realiza un paso con un tamaño de ventana de 32px. Los demás realizan los mismos pasos con los mismos tamaños de ventana que en el caso 1. A continuación se especifica el uso de pre-procesado y post-procesado:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	openPIV	PIVlab	PIVsuite
Pre-procesado	-	-	-	ok	ok	-
Post-procesado	-	-	-	ok	ok	-

**Tabla 5.** Configuración códigos caso 3

## **4. RESULTADOS**

Se analizarán los resultados obtenidos con distintos códigos para los casos descritos anteriormente. Se analizarán tres zonas de interés: cúpula de la burbuja, zonas alineadas dentro del lecho y zonas de alta vorticidad. La comparativa será principalmente de carácter cualitativo y, además, se tendrán en cuenta algunos valores numéricos como el tiempo de análisis y la velocidad de la cúpula de la burbuja. De este modo, se concluirá cuál de los códigos utilizados ofrece mejores prestaciones para el análisis digital de imágenes tomadas de lechos fluidizados en 2D.

### **4.2. CASO 1**

En este caso se han analizado fotografías con alta densidad de partículas por píxel. Se analizarán tres pares de fotografías.

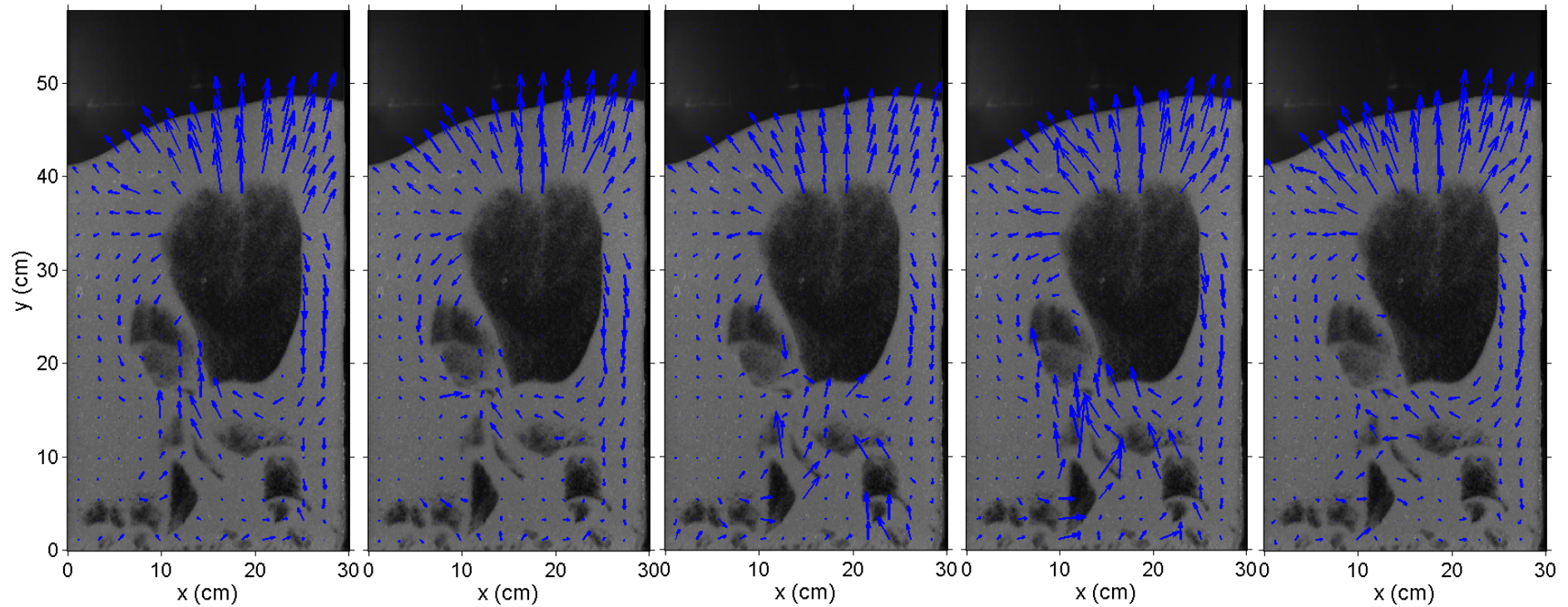
A continuación se mostrarán los resultados obtenidos, así como las conclusiones para cada par de imágenes analizado:

## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS

### RESULTADOS

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos, así como las conclusiones para cada par de imágenes analizado:

#### 4.2.1. Primer par de imágenes:



## RESULTADOS

Respecto a la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja cabe mencionar que los códigos matPIV 1.6 y 1.7 presentan una pequeña zona sin resultados en la parte superior izquierda. Los códigos mPIV y PIVlab sí que resuelve dicha zona pero con vectores *outlier*. En el lateral derecho, donde las partículas del lecho cambian de dirección, matPIV 1.6 lo resuelve de forma menos gradual que el resto de los códigos. Por lo demás esta zona es resuelta de manera similar con todos los códigos.

Los resultados en la zona alineada dentro del lecho son muy parecidos en todos los códigos utilizados. Cabe mencionar que PIVlab presenta algunos vectores *outlier* en la parte derecha del lecho.

Las mayores diferencias se encuentran en la zona de alta vorticidad donde el movimiento de las partículas es bastante más complejo. La mayor diferencia entre las dos versiones de matPIV se encuentra en la parte inferior de la burbuja principal y de la pequeña burbuja que se forma en la zona inferior izquierda de la misma, donde los vectores toman distintas direcciones. Los códigos mPIV y PIVlab ofrecen resultados bastante diferentes a los anteriores con algunos vectores de mayor módulo que los de la zona de la cúpula de la burbuja. La solución de PIVlab podría asemejarse más a la de matPIV 1.6 y la de mPIV a la de la versión 1.7 de matPIV atendiendo a la dirección de los vectores, aunque con diferencias bastante evidentes. Los resultados de PIVsuite, al igual que las dos versiones de matPIV, no presentan dichos vectores de gran módulo en comparación con el resto del lecho, sino que son bastante más pequeños que los de la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja. PIVsuite el código que ofrece mayor homogeneidad en cuanto al tamaño y orientación de los vectores con menor cantidad de *outliers* aunque, como se trata de una zona en la que las partículas del lecho realizan movimientos muy complejos, también presenta *outliers*.

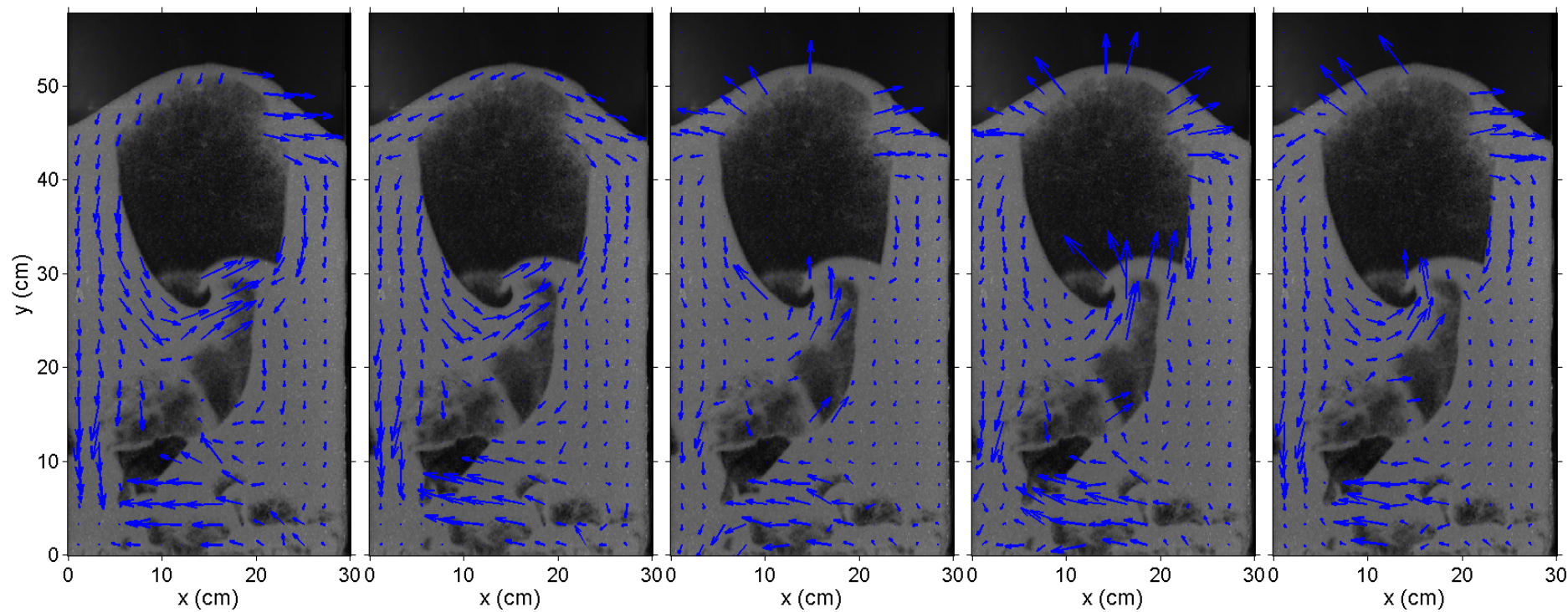
En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de los análisis con los distintos software para el primer par de imágenes:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	3.964788	5.107132	31.848447	18.372674	18.423091
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	65.2319	55.9558	63.8884	57.7843	64.9339

**Tabla 6.** Datos análisis primer par caso 1.

Se puede concluir, por lo tanto, que el código que mejor resuelve esta pareja de imágenes es **PIVsuite** teniendo en cuenta que los valores de velocidad se aproximan mucho a los medidos anteriormente y que presenta una menor cantidad de vectores incoherentes. Podrían seguir en segundo y tercer lugar PIVlab y matPIV 1.7.

**4.1.2. Segundo par de imágenes:**



**Figura 32. matPIV 1.6.**

**Figura 33. matPIV 1.7**

**Figura 34. mPIV**

**Figura 35. PIVlab**

**Figura 36. PIVsuite**

## RESULTADOS

En este par de imágenes la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja presenta una capa muy fina de partículas en la parte superior debido a que es una burbuja muy desarrollada, lo que supone que algunos códigos presenten soluciones erróneas. Esto sucede claramente con las dos versiones de matPIV en los que incluso los vectores que muestran llevan la dirección contraria al movimiento real de las partículas del lecho y con valores de velocidad muy inferiores a los que se han medido en el apartado 2 de este trabajo. El código PIVsuite resuelve esta zona erróneamente ya que los vectores no se distribuyen a lo largo de la cúpula de la burbuja radialmente y presenta *outliers* en la parte derecha. Ésta zona queda mejor resuelta por PIVlab, aunque también presenta *outliers* en la misma zona que PIVsuite. El código que mejor resuelve la zona de la cúpula de la burbuja es mPIV que muestra resultados concordantes con el movimiento real de las partículas sin vectores *outlier*.

La zona alineada dentro del lecho es resuelta de manera similar por todos los códigos utilizados, cabe mencionar que los resultados ofrecidos códigos matPIV 1.6 y PIVlab tienen una mayor cantidad de vectores *outlier*.

Los resultados en la zona de alta vorticidad son los que más varían en función del código que se utilice para su análisis. Respecto a las dos versiones del código matPIV utilizadas cabe mencionar que ofrecen resultados bastante parecidos, con una menor presencia de *outliers* en la versión 1.7. Se puede apreciar que la dirección de los vectores ofrecidos por las dos versiones de matPIV tiende más hacia el lado derecho justo debajo de la burbuja que en el resto de los códigos, en los que los vectores se orientan con una mayor componente vertical hacia arriba. Además cabe mencionar que el tamaño de los vectores en esta zona de alta vorticidad en la parte inferior de la burbuja es similar a los de la cúpula de la burbuja para todos los códigos excepto para las dos versiones de matPIV que, como ya se comentó anteriormente, no presentan buenos resultados en la zona de la cúpula de la burbuja comparándolos con el resto de los códigos y atendiendo al movimiento real que están realizando las partículas del lecho. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de los análisis con los distintos software para el segundo par de imágenes:

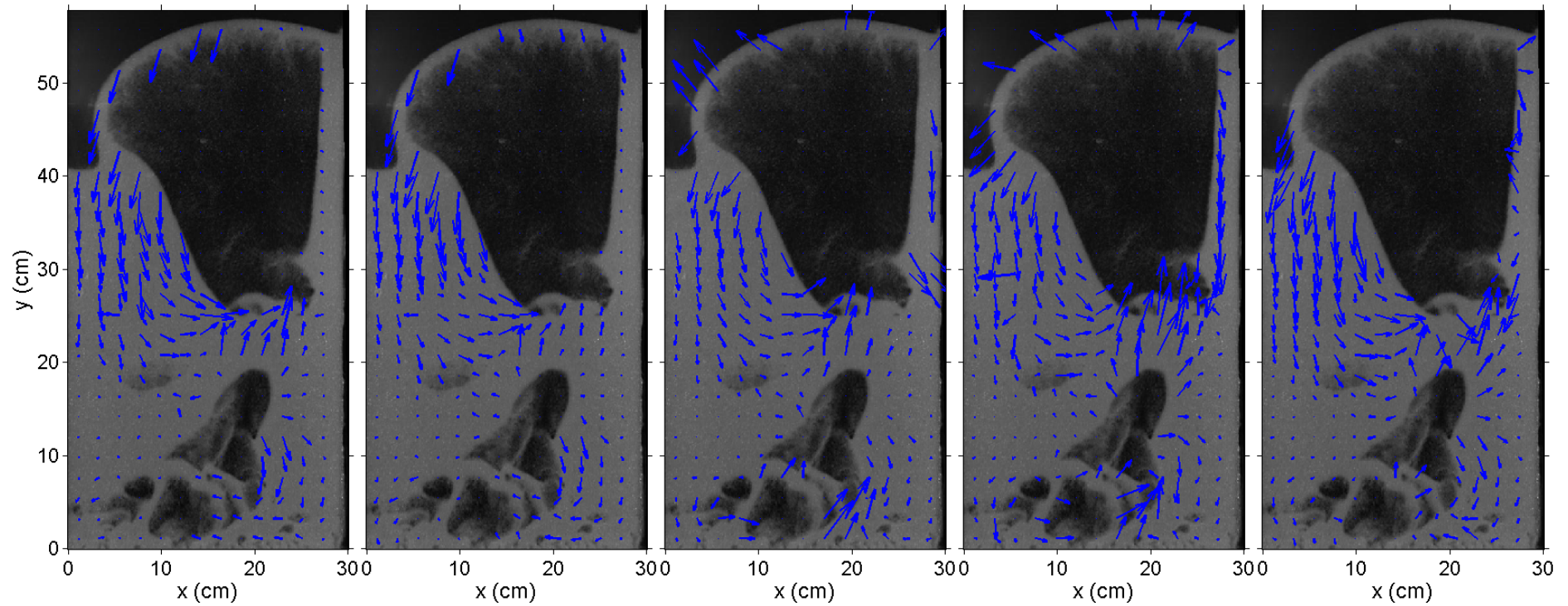
	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	4.209119	5.911206	22.970595	15.400021	15.516909
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	9.4305	13.4624	62.8702	63.9662	63.9636

**Tabla 7.** Datos análisis segundo par caso 1.

En este segundo par de imágenes el código que mejor resultados ofrece es **mPIV**, ya que es el que mejor resuelve la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja con valores más cercanos a los medidos anteriormente. Hay que tener en cuenta que es el que más tiempo emplea en el análisis. Podría situarse en segundo lugar el software PIVlab, que resuelve de manera bastante coherente las zonas de la cúpula de la burbuja y de alta vorticidad y empleando menos tiempo.



**4.1.3. Tercer par de imágenes:**



**Figura 37.** matPIV 1.6.

**Figura 38.** matPIV 1.7

**Figura 39.** mPIV

**Figura 40.** PIVlab

**Figura 41.** PIVsuite

## RESULTADOS

En este par de imágenes sucede lo mismo que en el anterior en la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja, la capa de partículas es muy fina y no se resuelve de forma coherente con las dos versiones del código matPIV. En el caso de PIVsuite directamente queda sin resolver. Tiene algo más de sentido la solución de mPIV, aunque deja varias partes con ausencia de vectores. La mejor solución para esta pareja de imágenes, en la zona de la cúpula de la burbuja se puede concluir que es la ofrecida por el código PIVlab ya que presenta una distribución de vectores en el sentido del movimiento de las partículas y con mayor densidad que el resto de los códigos.

En cuanto a la zona alineada dentro del lecho cabe mencionar que, en la parte izquierda, los resultados de los códigos matPIV tienen varios vectores *outlier*, disminuyendo la cantidad de éstos en la versión 1.7. Esto también sucede con el código PIVlab en la misma zona. Los que menos vectores espurios presentan en sus resultados son mPIV y PIVsuite. En el lateral derecho de la burbuja matPIV 1.6 y matPIV 1.7 presentan unos vectores casi nulos, como si no existiese casi movimiento. El software mPIV resuelve esta zona del mismo modo que la cúpula de la burbuja: con ausencias de vectores bastante notables. PIVsuite ofrece unos resultados plagados de vectores *outlier*. Y el software PIVlab es que presenta la solución más coherente con ausencia de *outliers*.

En la zona de alta vorticidad sucede algo parecido que en la pareja de imágenes anterior, en las dos versiones de matPIV la orientación de los vectores tiene una menor componente vertical ascendente que el resto de los códigos. La solución de PIVsuite es bastante incoherente en esta zona ya que la orientación de los vectores es descendente y existe una presencia abundante de *outliers*.

En este par de imágenes se puede apreciar claramente como los resultados de la versión 1.7 de matPIV mejora los resultados de manera general de la versión 1.6, presentando una menor cantidad de *outliers*. En la siguiente tabla se muestran las conclusiones obtenidas de los análisis con los distintos software para el tercer par de imágenes:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	4.863456	6.127788	25.520797	16.236491	16.254024
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	36.4326	13.3715	36.3431	30.4435	-

**Tabla 8.** Datos análisis tercer par caso 1.

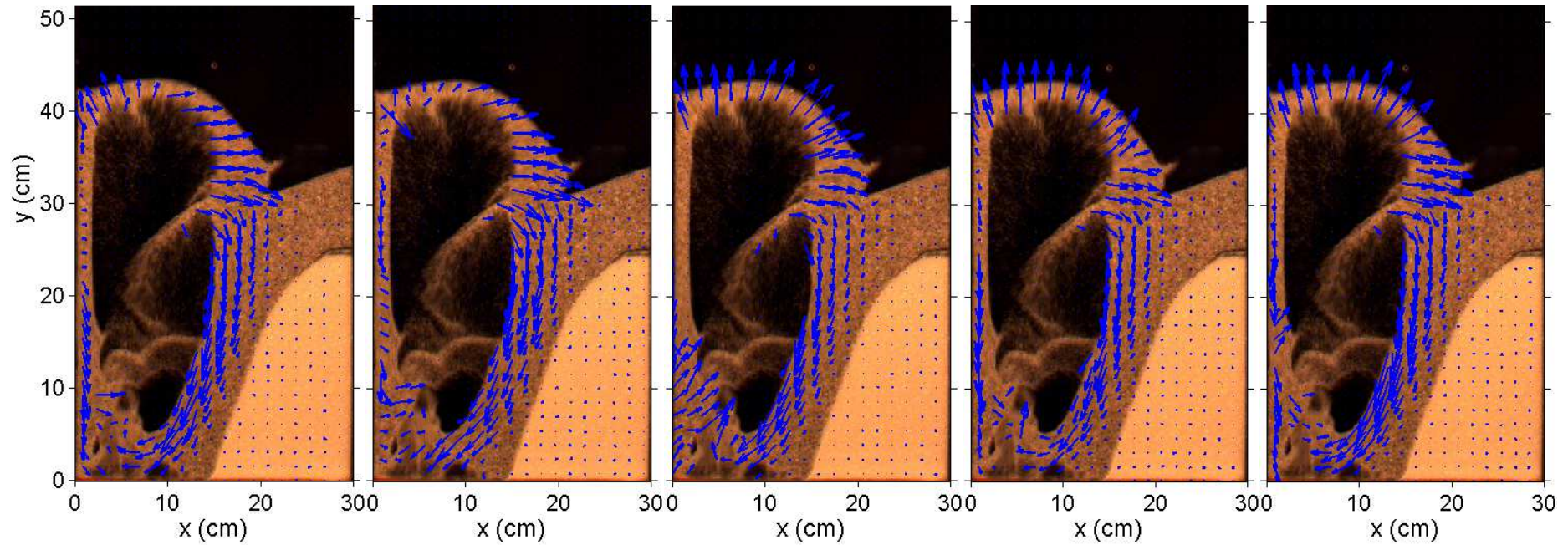
En este caso es **PIVlab** el que mejor resuelve esta pareja teniendo en cuenta los mejores resultados a nivel cualitativo en las zonas de la cúpula de la burbuja y de alta vorticidad. Podría seguirle mPIV ya que es el que da valores de velocidad más cercanos a los medidos, pero utiliza mayor cantidad de tiempo.

## **4.2. CASO 2**

En este caso se van a analizar fotografías con una baja densidad de partículas por píxel. Analizaremos tres pares de imágenes distintos.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos, así como las conclusiones para cada par de imágenes analizado:

**4.2.1. Primer par de imágenes:**



**Figura 42.** matPIV 1.6.

**Figura 43.** matPIV 1.7

**Figura 44.** mPIV

**Figura 45.** PIVlab

**Figura 46.** PIVsuite

## RESULTADOS

Respecto a los resultados obtenidos con el código matPIV 1.6 cabe destacar que en el lateral derecho de la zona de la burbuja los vectores del campo de velocidades no llevan la dirección en la que evoluciona la burbuja (dirección radial), sino que se dirigen horizontalmente hacia la derecha. Esto también ocurre con la versión 1.7 de este mismo código, aunque en este caso los valores de velocidad son aún menores. Además, las dos versiones de matPIV presentan gran cantidad de vectores espurio. Los códigos mPIV, PIVlab y PIVsuite presentan mejores resultados que matPIV en la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja, ya que los vectores siguen la dirección radial. Pero mPIV es el que ofrece valores de velocidad más cercanos a los obtenidos en el capítulo 2.

En la zona alineada dentro del lecho se obtienen resultados similares con los cuatro códigos en esta zona, donde las partículas descienden a velocidades inferiores que en la zona de la cúpula de la burbuja.

En cuanto a los resultados del análisis en la zona de alta vorticidad se observa una mayor cantidad de vectores espurio ya que se trata de una zona en la que hay muchos cambios de dirección de las partículas del lecho fluido. Todos los resultados, excepto el de matPIV 1.7, describen la curva que realiza el lecho fluidizado al llegar a la zona inferior, tras descender por el lado donde hay una acumulación de partículas. Siendo mPIV y PIVlab los que mejor describen dicho cambio de dirección.

Por el lado contrario, es decir, el lado que está en contacto con la pared del lecho ocurre algo similar en la zona inferior ya que las partículas descienden y, al llegar abajo, realizan un giro hacia la zona del centro. Cada código lo resuelve de una forma, quizá la que más se aproxime al movimiento real de las partículas sea la solución de PIVlab.

Cabe mencionar que en la parte superior del lado en contacto con la pared, algunas partículas siguen una trayectoria ascendente debido al crecimiento de la burbuja y otras descienden pegadas a la pared. Debido a esto, existe un punto en que hay un cambio total de dirección en el que el campo de velocidades pasa de ser vertical hacia arriba a vertical hacia abajo. Esto queda reflejado en los resultados ofrecidos por los códigos mPIV, PIVlab y PIVsuite. Pero las dos versiones de matPIV ofrecen unos resultados menos claros y cargados de vectores espurios. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de los análisis con los distintos software para el primer par de imágenes:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	6.028139	6.754928	16.261168	29.127592	17.085280
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	19.23-28.84	10.5769	76.92-86.53	72.1154	54.8077

**Tabla 9.** Datos análisis primer par caso 2.

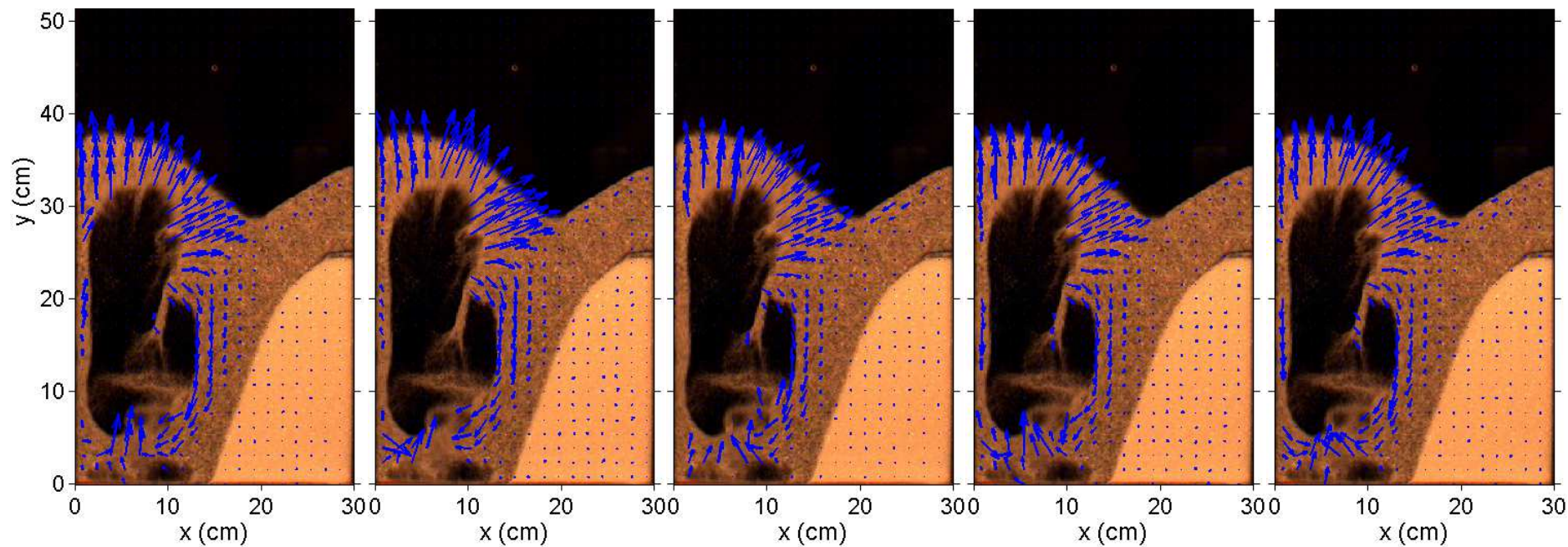
## RESULTADOS

La mejor solución de esta pareja de imágenes está entre mPIV y PIVlab y PIVsuite. PIVlab es el que mejor resuelve la zona de alta vorticidad y la cercana a la pared, pero mPIV presenta valores de velocidad más concordantes con los medidos y utiliza menos tiempo en el análisis. Por lo tanto es **mPIV** parece la solución más indicada.



VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS  
RESULTADOS

4.2.2. Segundo par de imágenes:



**Figura 47.** matPIV 1.6.

**Figura 48.** matPIV 1.7

**Figura 49.** mPIV

**Figura 50.** PIVlab

**Figura 51.** PIVsuite

## RESULTADOS

En este segundo par de imágenes la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja es resuelta de manera similar con todos los códigos. En este caso la capa de partículas que bordea la burbuja es más gruesa, lo que resulta más fácil de resolver para todos los códigos. A nivel cuantitativo el código que mejores valores de velocidad en esta zona presenta es PIVsuite, ya que coincide con el valor de 76.92 cm/s que se obtuvo en el capítulo 2 de este trabajo.

La zona alineada dentro del lecho, cercana al lateral derecho donde se acumulan las partículas, es también resuelta de manera similar por todos los códigos.

Las mayores diferencias entre estos resultados se aprecian en la zona inferior en la que hay alta vorticidad y en la zona en contacto con la pared del lecho.

Los códigos matPIV 1.6 y matPIV 1.7 ofrecen resultados parecidos en la zona de alta vorticidad, aunque la versión 1.7 de este código deja sin resolver una pequeña zona en la que no aparecen vectores. Como se trata de una zona en la que hay muchos cambios en la dirección del movimiento de las partículas, y por lo tanto es más difícil de analizar, surgen algunos vectores espurios. El código mPIV presenta aún una menor densidad de vectores, dejando una pequeña zona sin resolver, como sucede con matPIV 1.7. PIVlab resuelve esta zona con una alta densidad de vectores, bastante parecida a matPIV 1.6, pero con mayor cantidad de vectores *outlier*. El código PIVsuite es el que mejores resultados ofrece describiendo de una forma bastante fiel el movimiento real de las partículas.

La zona en contacto con la pared queda mejor resuelta por el código PIVsuite, ya que se puede apreciar con claridad un punto en el que los vectores cambian de dirección. Los resultados de PIVlab también presentan dichos cambios de dirección, aunque de forma distinta que PIVsuite y presentando algún vector *outlier*. Las dos versiones de matPIV resuelven esta zona de manera parecida, pero en la versión 1.7 se puede apreciar una tendencia de los vectores hacia el centro de la burbuja en la zona superior. mPIV es el que peor resuelve esta zona debido a que la división de la imagen en ventanas de interrogación es distinta y solo muestra una fila de vectores. En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de los análisis con los distintos software para el segundo par de imágenes:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	5.761270	17.542972	18.142334	33.473759	16.130553
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	57.6923	52.8846	64.4231	62.5	76.9231

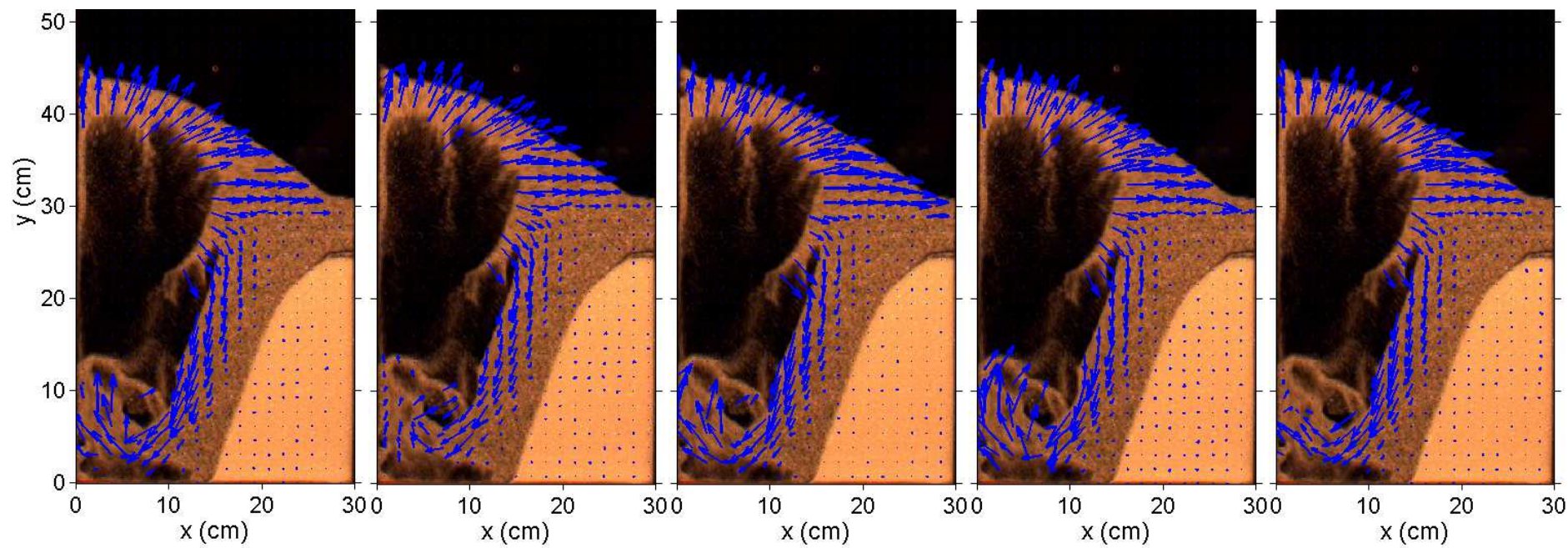
**Tabla 10.** Datos análisis segundo par caso 2.

Como se ha ido comentando anteriormente **PIVsuite** es el que mejor análisis realiza del campo de velocidades en esta pareja de imágenes.



VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS  
RESULTADOS

**4.2.3. Tercer par de imágenes:**



**Figura 52.** *matPIV 1.6.*

**Figura 53.** *matPIV 1.7*

**Figura 54.** *mPIV*

**Figura 55.** *PIVlab*

**Figura 56.** *PIVsuite*

## RESULTADOS

En este tercer par de imágenes la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja tiene una capa bastante gruesa de partículas, por lo que todos los códigos resuelven esta zona con resultados bastante parecidos. Cabe mencionar que el código matPIV 1.6 presenta una pequeña zona con ausencia de vectores. Todos los códigos presentan valores de velocidades inferiores a los obtenidos tomando como referencia la sonda del lecho, siendo mPIV y PIVsuite los que más se aproximan con valores de 57.69 cm/s.

Los cinco códigos resuelven de forma similar la zona alineada dentro del lecho, donde las partículas descienden por la derecha.

En este caso, la burbuja es de gran tamaño y la parte izquierda del lecho presenta una capa muy fina de partículas, por lo que no todos los códigos resuelven esta zona. Son las dos versiones de matPIV y PIVlab los códigos que presentan resultados aquí. El punto en el que las partículas cambian de dirección queda representado únicamente por matPIV 1.6 y PIVlab, siendo éste último el que mejor lo representa, ya que el cambio de dirección es gradual.

La zona de alta vorticidad es en la que se encuentran mayores diferencias en cuanto a los resultados presentados por cada uno de los códigos utilizados. Cabe mencionar que hay tres códigos que dan valores de velocidad mayores en esta zona, son matPIV 1.6, mPIV y PIVlab, siendo éste último el que mayor cantidad de vectores ofrece.

En la siguiente tabla se muestran las conclusiones obtenidas de los análisis con los distintos software para el tercer par de imágenes:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	9.27039	7.515174	24.948704	30.281287	19.467400
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	50.9615	43.2692	52.8846	48.0769	57.6923

**Tabla 11.** Datos análisis tercer par caso 2.

Se puede concluir, por lo tanto, que **PIVsuite** es el código que mejores resultados obtiene del análisis de este par de imágenes. Siendo PIVlab la segunda mejor opción, aunque necesita mayor tiempo para realizar el análisis.

### 4.3. CASO 3

Este es el caso que mayor densidad de partículas por píxel tiene. También se analizarán tres pares de fotografías.

En este tercer caso también se ha utilizado el software openPIV ya que, al tratarse de fotografías con alta densidad de partículas por píxel, no presenta tantos vectores *outlier* como en los otros casos.

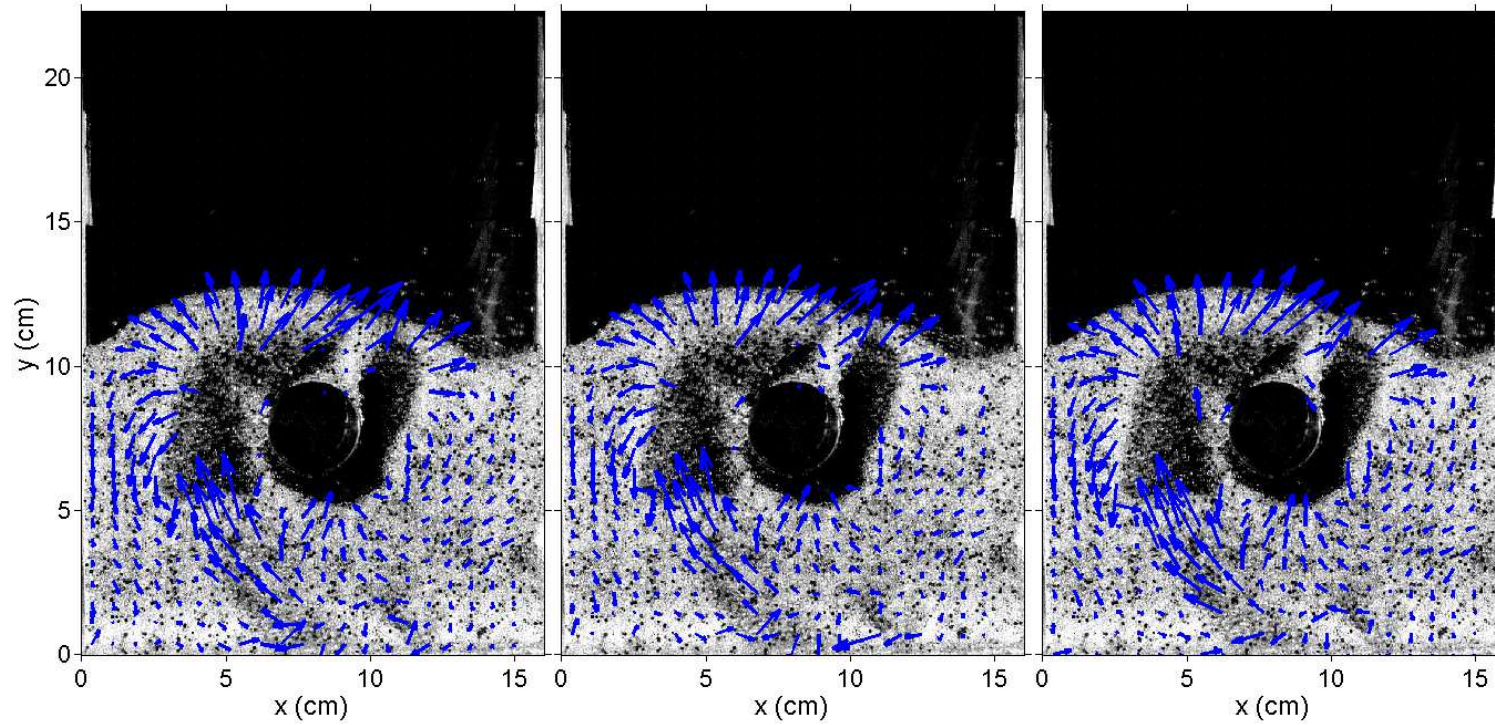
A continuación se mostrarán los resultados obtenidos, así como las conclusiones para cada par de imágenes analizado:

## VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS

### RESULTADOS

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos, así como las conclusiones para cada par de imágenes analizado:

#### 4.3.1. Primer par de imágenes:



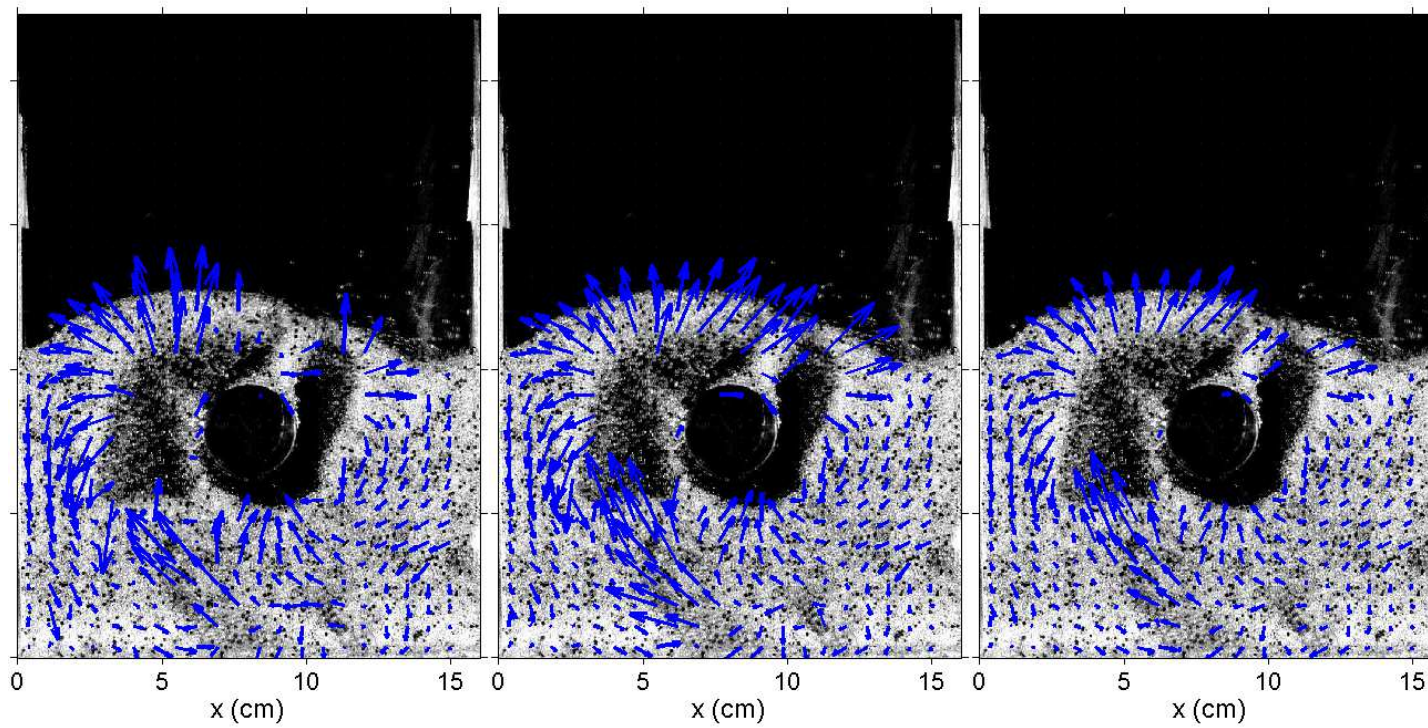
**Figura 57.** matPIV 1.6.

**Figura 58.** matPIV 1.7

**Figura 59.** mPIV



VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS  
RESULTADOS



**Figura 60.** openPIV

**Figura 61.** PIVlab

**Figura 62.** PIVsuite

## RESULTADOS

En este caso vamos a tener en cuenta dos burbujas, la de la parte derecha y la de la parte izquierda.

Los resultados en la zona de la cúpula de la burbuja del lado izquierdo son bastante parecidos con todos los códigos. Cabe destacar que en el código matPIV 1.7 y mPIV tienen una mayor densidad de vectores en el lateral derecho de dicha burbuja. El código openPIV no resuelve el lado derecho de esta burbuja dejando ausencia de vectores con algún outlier.

La cúpula de burbuja izquierda queda casi sin resolver con el código PIVsuite y con el código openPIV los resultados contienen vectores *outlier*.

Las zonas de alineamiento dentro del lecho son resueltas similarmente con todos los códigos.

Los resultados en las zonas de alta vorticidad son bastante similares con todos los códigos, excepto con openPIV están plagados de outliers y sobre todo en la parte inferior de la burbuja del lado izquierdo.

En la zona inferior del lecho es donde aparece una mayor cantidad de vectores *outlier* en todos los códigos.

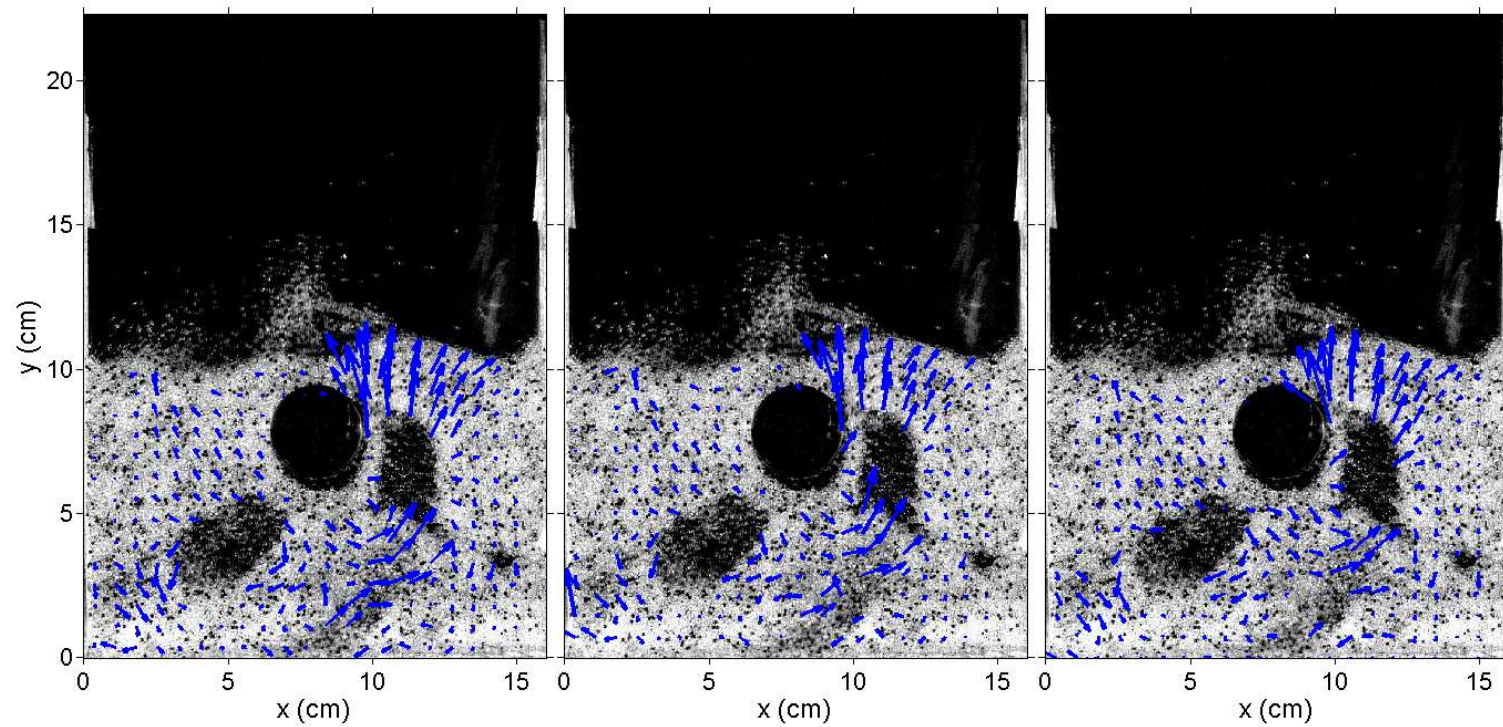
En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de los análisis con los distintos software para el primer par de imágenes:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	OpenPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	1.444398	3.126395	22.003160	15.797901	37.035851	21.094247
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	27.3183	28.8387	28.1172	26.1553	27.5733	29.3417

**Tabla 12.** Datos análisis primer par caso 3.

Se puede concluir que **mPIV** es el que mejor análisis realiza en este primer par de imágenes teniendo en cuenta los valores de velocidad en la cúpula de la burbuja y la poca presencia de *outlier*. PIV ocupa el segundo lugar.

**4.3.2. Segundo par de imágenes:**

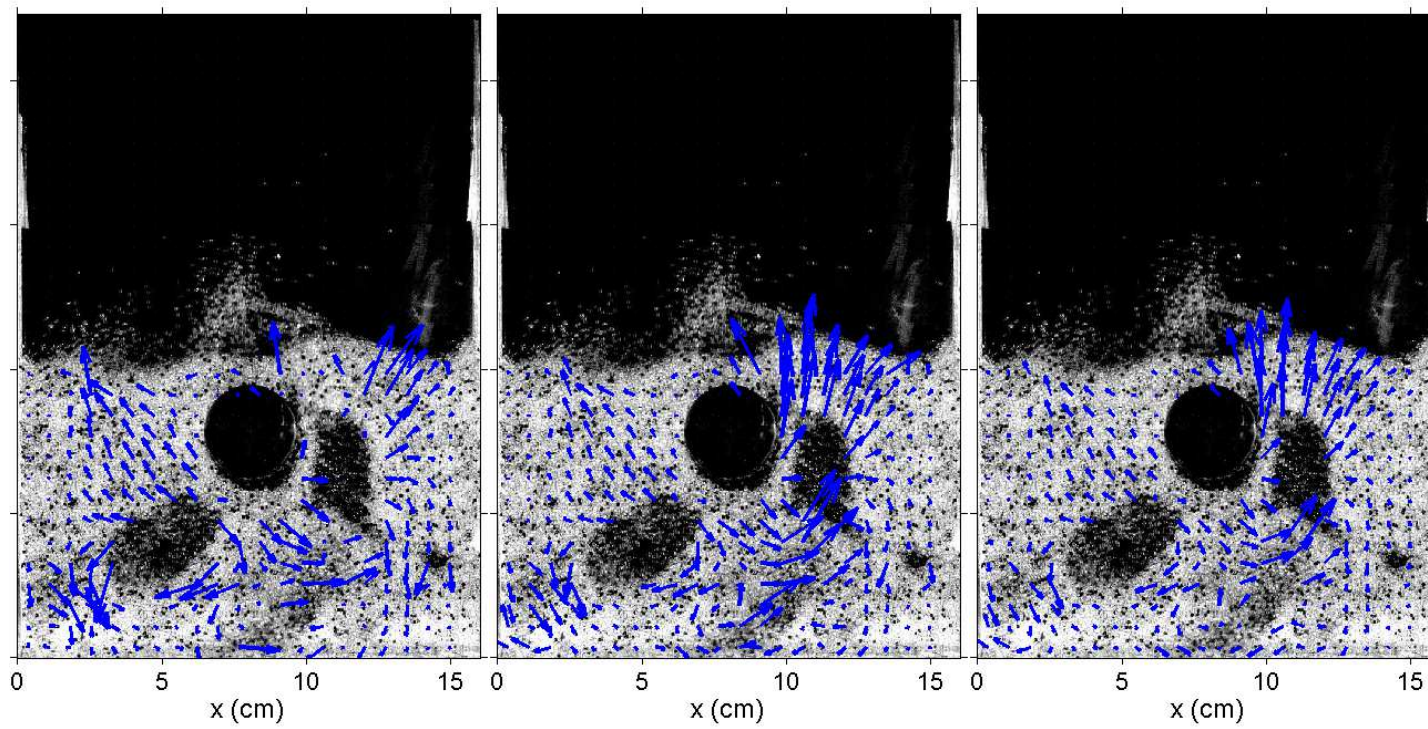


**Figura 63. matPIV 1.6.**

**Figura 64. matPIV 1.7**

**Figura 65. mPIV**

VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS  
RESULTADOS



**Figura 66.** openPIV

**Figura 67.** PIVlab

**Figura 68.** PIVsuite



## RESULTADOS

Todos los códigos ofrecen resultados similares en la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja, a la derecha del tubo. Cabe destacar la presencia de algún vector *outlier* en la solución de matPIV 1.7 y los malos resultados de openPIV plagados de outliers.

Existe una zona de alineamiento a la izquierda del tubo en la que coinciden todas las soluciones de los códigos utilizados con valores de velocidad inferiores a los de la cúpula de la burbuja, lo cual tiene sentido porque se trata de una zona en la que hay poco movimiento.

En la zona inferior de la burbuja del lado derecho, donde existe alta vorticidad cabe mencionar que la solución del código mPIV presenta vectores con menor componente vertical que los demás. Además openPIV presenta resultados con poca densidad de vectores y con orientación incoherente.

Los resultados de la zona de la capa de partículas que rodea la burbuja del lado izquierdo son parecidos en todos los códigos, siendo los del código matPIV 1.7 los que menor densidad de vectores y mayor cantidad de *outlier* presenten.

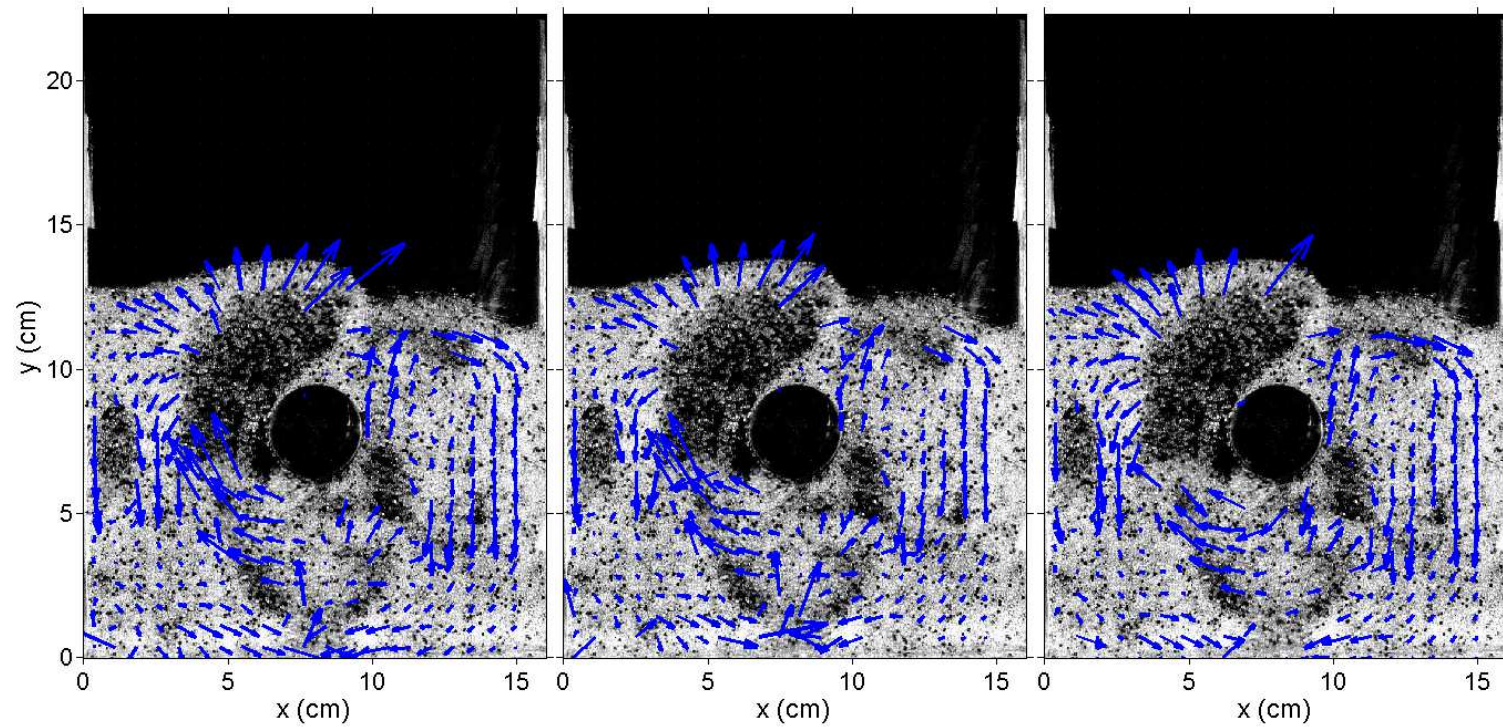
En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos de los análisis con los distintos software para el segundo par de imágenes:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	OpenPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	1.361956	2.578989	20.726018	7.427333	26.916148	20.086495
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	48.1570	45.7058	49.6706	2.2760	40.3346	42.2282

**Tabla 13.** Datos análisis segundo par caso 3.

Es **matPIV 1.6** el código que mejor resuelve esta pareja, atendiendo al poco tiempo que utiliza en el análisis, a los valores de velocidad que ofrece. Le siguen mPIV y PIVsuite, en este orden, siguiendo los mismos criterios.

**4.3.3. Tercer par de imágenes:**

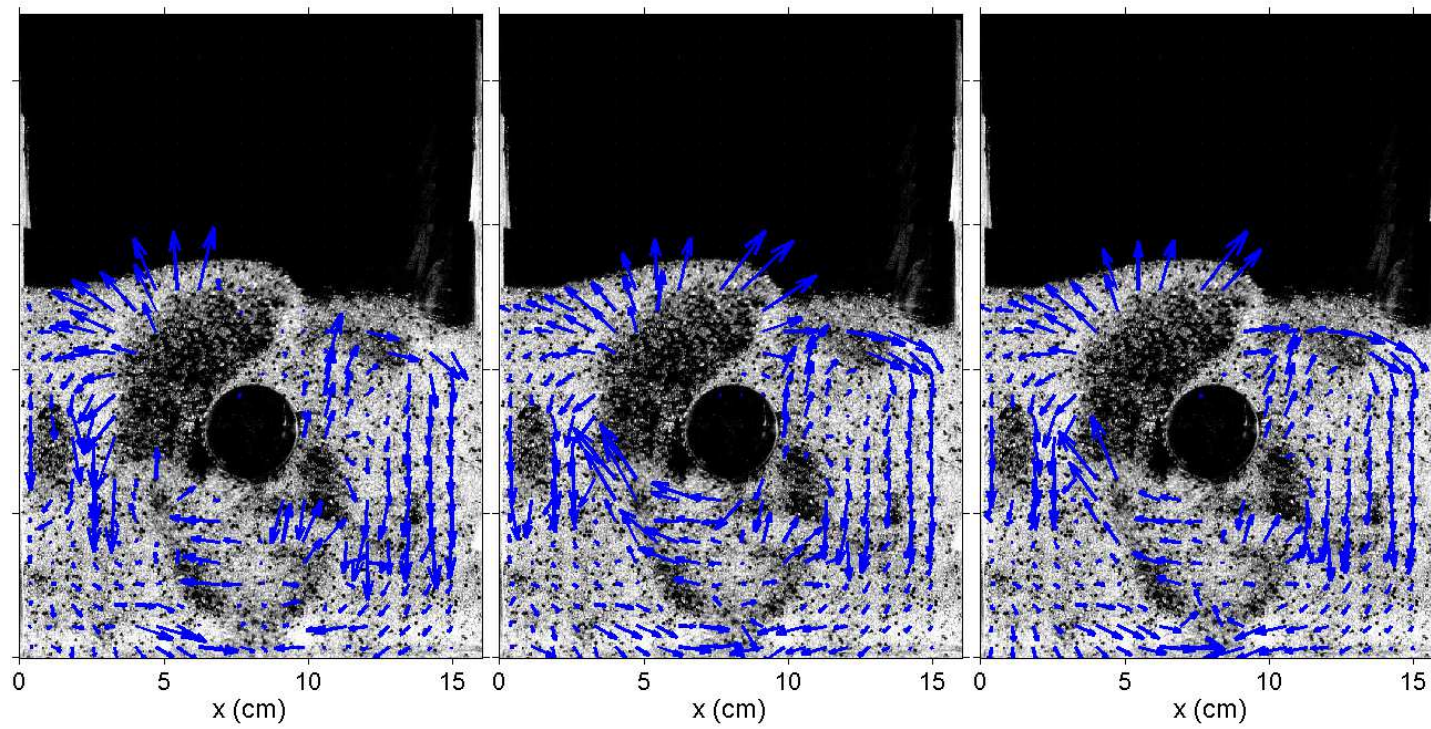


**Figura 69. matPIV 1.6.**

**Figura 70. matPIV 1.7**

**Figura 71. mPIV**

VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS  
RESULTADOS



**Figura 72.** openPIV

**Figura 73.** PIVlab

**Figura 74.** PIVsuite

## RESULTADOS

Los códigos matPIV 1.7 y mPIV presentan una mayor densidad de vectores en la parte izquierda de la zona de crecimiento de la cúpula de la burbuja. Pero hay que destacar mPIV tiene muy poca densidad de vectores en la parte más a la izquierda de esta zona y que matPIV 1.7 presenta vectores *outlier* de gran tamaño en dicha zona.

Al lado derecho del tubo existe una zona en la que hay una pequeña burbuja de la que cabe mencionar que todos los códigos presentan resultados en esta zona bastante coincidentes, siendo los de mPIV los que tienen una mayor densidad de vectores.

La zona de alineamiento al lado derecho del lecho es resuelta similarmente por todos los códigos que se han utilizado. Lo mismo sucede con la zona de alineamiento de la parte izquierda del lecho.

De la zona de alta vorticidad cabe comentar que los vectores de las soluciones de los códigos matPIV (las dos versiones) tienen una menor componente vertical y los de mPIV y openPIV tienen vectores *outlier*.

Es destacable que los resultados del código matPIV 1.7 tienen, a lo largo de todo el lecho, vectores incoherentes de gran tamaño.

En la siguiente tabla se muestran las conclusiones obtenidas de los análisis con los distintos software para el tercer par de imágenes:

	matPIV 1.6	matPIV 1.7	mPIV	OpenPIV	PIVlab	PIVsuite
<b>Tiempo análisis (s)</b>	1.499811	3.028347	21.325186	10.774440	28.845843	21.149734
<b>Velocidad zona cúpula burbuja (cm/s)</b>	33.0219	31.8725	35.7053	28.7932	33.1494	33.0560

**Tabla 14.** Datos análisis tercer par caso 3.

Los códigos **PIVlab** y **PIVsuite** presentan resultados similares en cuanto a tiempo y valores de velocidad. PIVlab presenta una mayor cantidad de vectores debido a la distinta utilización de la máscara, pero PIVsuite tiene una menor cantidad de vectores *outlier*. Hay que destacar el buen análisis de matPIV 1.6 que realiza en muy poco tiempo.

## CONCLUSIONES

### 5. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se han realizado una serie de tareas con la finalidad de decidir, entre distintas alternativas de software libre, cuál de ellas es la más adecuada para su aplicación en lechos fluidizados. Dichas tareas comprenden desde la selección inicial de varios códigos hasta su posterior comparativa desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo.

Los códigos utilizados en el estudio están escritos en lenguaje de Matlab y son los siguientes: MatPIV, mPIV, openPIV (basado en URAPIV), PIVlab y PIVsuite (basado en PIVlab).

Dichos códigos han sido adaptados para su uso en el análisis de lechos fluidizados, realizando tareas como aplicar máscaras que permiten eliminar del análisis las zonas donde se crean burbujas o existen obstáculos, como es el caso de la instalación 3. Este paso es previo al análisis PIV de las parejas de imágenes, tomadas de las tres instalaciones experimentales que se describen en el apartado 2 de este trabajo.

El siguiente paso ha sido realizar el cálculo de PIV en sí mismo, obteniendo información de los valores de velocidad de las partículas y tiempo empleado. Y con toda la información recopilada, se ha podido realizar la comparativa entre los resultados y tomar la decisión de cuál de los códigos se recomienda para su uso en lechos fluidizados.

A la vista de la comparativa realizada se puede concluir que el código PIVsuite es el que mejores resultados ofrece, de manera general, en las nueve parejas de imágenes analizadas. Cabe destacar que mPIV le sigue en segundo lugar, sobre todo por sus buenos resultados en las imágenes en las que la burbuja está muy desarrollada y la capa superior de partículas es muy fina. Hay que tener en cuenta que estos dos programas, junto con PIVlab, son los que más tiempo emplean en el análisis. Hay que tener en cuenta que mPIV realiza el análisis con el método de diferencias cuadráticas mínimas, lo que influye mucho en el tiempo de ejecución.

Además, se pueden sacar otro tipo de conclusiones como que, en general, matPIV 1.7 y PIVsuite mejoran los resultados de matPIV 1.6 y PIVlab respectivamente en el sentido de que presentan menor cantidad de *outliers*. Pero éstos no siempre ofrecen mejores resultados a nivel cualitativo.

openPIV presenta los peores resultados ya que se trata de un programa de gran simpleza en todos los aspectos frente a los demás. Pero hay que tener en cuenta que, cuando las imágenes tienen alta resolución, es capaz de realizar análisis coherentes y empleando muy poco tiempo.

También es destacable que, en el caso 3, al no utilizar post-procesado en los códigos matPIV 1.6 y matPIV 1.7 la cantidad de tiempo empleada en el análisis disminuye considerablemente. Esto no sucede en la misma medida en los códigos mPIV y PIVsuite, que son los otros códigos a los que no se les ha aplicado post-procesado.

## CONCLUSIONES

Por último cabe mencionar que a los códigos que más le afecta la disminución de la resolución de las imágenes son matPIV 1.6 y matPIV 1.7 y a los que menos son PIVlab y PIVsuite, ocupando mPIV la posición intermedia. La presencia de partículas trazadoras afecta positivamente a todos los códigos, sobre todo a matPIV 1.6, matPIV 1.7 y PIVlab. De hecho, en el caso de matPIV se ha podido prescindir del post-procesado debido a ellas. Evidentemente, también a openPIV le favorece tanto la buena resolución de las imágenes como la presencia de partículas trazadoras, ya que sólo se han encontrado resultados aceptables en el tercer caso.

## REFERENCIAS

## REFERENCIAS

- [1] Moler, Cleve B., "Numerical Computing with MATLAB", Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004, ISBN 978-0-89871-560-6.
- [2] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns," Chemical Engineering Progress, vol. 48, pp. 89–94, 1952.
- [3] CY Wen, YH Yu - AIChE Journal, 1966.
- [4] D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidization Engineering, 2<sup>nd</sup> Edition, Butterworth-Heinemann (1991).
- [5] D. Geldart, Types of Gas Fluidization, Powder Technology, 7 (1973) 285 – 292.
- [6] R.M. Davies, S.G. Taylor, The Mechanics of Large Bubbles Rising Through Extended Liquids and Through Liquids in Tubes, Proceedings of the Royal Society A, 200 (1950) 375 – 390.
- [7] García I Vizcaino D., 2005, Sistema láser de medida de velocidad por efecto Doppler de bajo coste para aplicaciones industriales hidrodinámicas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [8] Sara Nauri PhD Thesis, *Implementation and development of advanced algorithms of LFC-PIV in Stereoscopic PIV systems and its application to flows of industrial interest.*
- [9] Willert CE, Gharib M (1991), "Digital particle image velocimetry", Exp. Fluids, Vol. 10, pp 181-193.
- [10] Adrian RJ (1991), "Particle-image techniques for experimental fluid mechanics", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, pp 261-304.
- [11] Pickering JD and Halliwell NA (1984), "Speckle photography in fluid flows: signal recovery with two-steps processing", Appl. Optics, Vol. 23(8), pp 1128-1129.
- [12] LaVision FlowMaster. Advanced PIV system for Quantitative flow field analysis.
- [13] Wiener, Norbert (1930). "Generalized Harmonic Analysis". Acta Mathematica 55: 117–258. DOI: 10.1007/bf02546511.
- [14] Khintchine, Alexander (1934). "Korrelationstheorie der stationären stochastischen Prozesse". Mathematische Annalen 109 (1): 604–615. DOI: 10.1007/BF01449156.
- [15] Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. (1998), "Particle image velocimetry", Springer. Berlin/Heidelberg.

## REFERENCIAS

- [16] J. Kristian Sveen: "An introduction to MatPIV v. 1.6.1", eprint series, Dept. of Math. University of Oslo, "Mechanics and Applied Mathematics"
- [17] Rafael C. Gonzales and Richard E. Woods. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, 1992.
- [18] J. Grue, A. Jensen, P-O. Rusås, and J.K. Sveen. Properties of large amplitude internal waves. *J. Fluid Mech.*, 380:257–278, 1999.
- [19] L. Gui and W. Merzkirch. Generating arbitrarily sized interrogation windows for correlation-based analysis of particle image velocimetry recordings. *Exp. Fluids*, 21:465–468, 1996.
- [20] L. Gui and W. Merzkirch. A comparative study of the mqd method and several correlation-based piv evaluation algorithms. *Exp. Fluids*, 28:36–44, 2000.
- [21] Atle Jensen, J. Kristian Sveen, John Grue, Jean-Baptiste Richon, and Callum Gray. Accelerations in water waves by extended particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 30:500–510, 2001.
- [22] Richard D. Keane and Ronald J. Adrian. Theory of cross-correlation analysis of piv images. *Applied Scientific Research*, 49:191–215, 1992.
- [23] M. Raffel, C. E. Willert, and J. Kompenhans. *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*. Springer Verlag, first edition, 1998.
- [24] J. K. Sveen and E. A. Cowen. Quantitative imaging techniques and their application to wavy flow. In J. Grue, P. L. F. Liu, and G. K. Pedersen, editors, *PIV and Water Waves*. World Scientific, 2004.
- [25] J. Westerweel. *Digital Particle Image Velocimetry- Theory and Application*. PhD thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1993.
- [26] J. Westerweel, D. Dabiri, and M. Gharib. The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital piv recordings. *Exp. Fluids*, 23:20–28, 1997.
- [27] Quian, L. and Cowen, E.A. (2005). "An efficient anti-aliasing spectral continuous window shifting technique for PIV". *Experiments in Fluids*.
- [28] Página web del software mPIV: <http://www.oceanwave.jp/software/mpiv>
- [29] ooDACE Toolbox: A Flexible Object-Oriented Kriging Implementation pdf I. Couckuyt, T. Dhaene, P. Demeester, *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 15, pp. 3183-3186, October 2014.



## REFERENCIAS

- [30] Blind Kriging: Implementation and performance analysis pdf I. Couckuyt, A. Forrester, D. Gorissen, F. De Turck, T. Dhaene, *Advances in Engineering Software* (Elsevier), Vol. 49, No. 3, pp. 1-13, July 2012
- [31] G. Golub, C. Van Loan, *Matrix Computations*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA, 3rd edition, 1996.
- [32] E.H. Isaaks, R.M. Srivastava, *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, USA, 1989
- [33] J. Kowalik, M.R. Osborne, *Methods for Unconstrained Optimization Problems*. Elsevier, New York, USA, 1968.
- [34] S.N. Lophaven, H.B. Nielsen, J. Søndergaard, Aspects of the Matlab Toolbox DACE. Report IMM-REP-2002-13, Informatics and Mathematical Modelling, DTU. (2002), 44 pages. Available as <http://www.imm.dtu.dk/~hbn/publ/TR0213.ps>
- [35] M.D. McKay, W.J. Conover, R.J. Beckman, *A comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code*, *Technometrics*, vol. 21, no. 2, 1979.
- [36] W. G. Muller, *Collecting Spatial Data. Optimum Design of Experiments for Random Fields*. Physica-Verlag, Heidelberg, Germany, 2001.
- [37] J. Nocedal, S.J. Wright, *Numerical Optimization*, Springer, New York, USA, 1999.
- [38] J.A. Royle, D. Nychka, An Algorithm for the Construction of Spatial Coverage Designs with Implementation in Splus, *Computers and Geosciences*, vol. 24, no. 5, pp. 479-488, 1998.
- [39] J. Sacks, W.J. Welch, T.J. Mitchell, H.P. Wynn, *Design and Analysis of Computer Experiments*, *Statistical Science*, vol. 4, no. 4, pp. 409-435, 1989.
- [40] T.W. Simpson, J.D. Peplinski, P.N. Koch, J.K. Allen, *Metamodels for Computer-Based Engineering Design: Survey and Recommendations Engineering with Computers*, vol. 17, pp. 129-150, 2001.
- [41] Taylor, Z.J.; Gurka, R.; Kopp, G.A.; Liberzon, A. , *Long-Duration Time-Resolved PIV to Study Unsteady Aerodynamics*, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* , vol.59, no.12, pp.3262-3269, Dec. 2010. DOI: 10.1109/TIM.2010.2047149. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5464317&isnumber=5609237>

## REFERENCIAS

- [42] Thielicke, W. and Stamhuis, E.J. (2014): PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software* 2(1):e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>
- [43] Thielicke, W. and Stamhuis, E. J. (2014): PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version: X.XX~~modify this~~). <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508>
- [44] Thielicke, W. (2014): The Flapping Flight of Birds - Analysis and Application. Phd thesis, Rijksuniversiteit Groningen. <http://irs.ub.rug.nl/ppn/382783069>
- [45] Vejražka, J. PIVsuite. 2014. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45028-pivsute>